



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO

MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA AMBIENTAL



Facultad de Ingeniería Civil

**“Mezcla asfáltica con adición de
material reciclado, PET y polvo de caucho,
para el aumento de resistencia por fatiga”**

TESIS PROFESIONAL

Para obtener el título:

Maestra en Ciencias en Ingeniería Ambiental

PRESENTA:

ING. SHANNIT HAIATT SILVA TORRES

ASESOR:

DR. HUGO LUIS CHÁVEZ GARCÍA

Co - ASESOR:

DRA. ELIA MERCEDES ALONSO GUZMÁN

Tesis apoyada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

MORELIA, MICHOACÁN, NOVIEMBRE DE 2024

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

Tabla de contenido

Índice de tablas.....	6
RESUMEN	8
ABSTRACT.....	9
INTRODUCCIÓN	10
CAPITULO I INTRODUCCIÓN.....	15
PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	15
1.1 Planteamiento del problema.....	15
1.2 Justificación.....	16
1.2.1 Justificación practica o social.....	17
1.2.2 Justificación técnica	18
1.3 Delimitaciones.....	18
1.3.1 Espacial	18
1.3.2 Temporal.....	19
1.3.3 Económica	19
1.4 Limitaciones	19
1.5 Objetivos	20
1.5.1 Objetivo general.....	20
1.5.2 Objetivos específicos.....	20
CAPITULO II REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE	21
2.1 Antecedentes.....	21
2.1.1 Antecedentes internacionales.....	21
2.1.2 Antecedentes nacionales.....	22
2.2 Generalidades.....	23
2.3 Antecedentes del PET (Tereftalato de polietileno)	26
2.4 PET	27
2.5 Marco conceptual	28
2.5.1 Caucho	28
2.5.2 Pétreos.....	32
2.5.3 PET.....	34
2.5.4 Ventajas y desventajas del PET	34

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

2.5.5 Asfalto.....	35
2.6 Mezclas asfálticas.....	36
2.6.1 Componentes de la mezcla asfáltica en caliente	37
2.6.2 Características, funcionalidad y comportamiento de la mezcla asfáltica en su estado caliente	38
2.6.3 Clasificación de la mezcla asfáltica por la proporción de vacíos.....	39
2.6.4 Diseño de la mezcla convencional.....	39
2.6.5 Composición química de la mezcla asfáltica	39
2.7 Hipótesis	40
2.8 Variables.....	40
2.8.1 Variable independiente	40
2.8.2 Variable dependiente	40
2.9 Pirolisis.....	41
2.9.1 Ventajas y desventajas.....	43
CAPITULO III METODOLOGÍA	43
3.1 Método de investigación.....	43
3.2 Tipo de investigación	44
3.3 Población y muestra.....	46
3.3.1 Población	46
3.3.2 Muestra	47
3.4 Recolección de datos y materiales.....	47
3.4.1 Polvo de caucho (Neumático).....	47
3.4.2 Fibras de PET	48
3.5 Procesamiento de la información y pruebas	49
3.6 Caracterización de asfalto	50
3.6.1 Penetración.....	50
3.6.2 Punto de ignición de Cleveland.....	50
3.6.3 Punto de reblandecimiento	51
3.6.4 Ductilidad.....	52
3.7 Caracterización de los pétreos	53
3.7.1 Cuarteo	53

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

3.7.2 Granulometría	54
3.7.3 Partículas alargadas y lajeadas	54
3.7.4 Desgaste de los ángeles.....	55
3.7.5 Densidad en gravas.....	56
3.7.6 Absorción	57
3.7.7 Equivalente de arena.....	58
3.8 Diseño Método Marshall.....	59
3.9 Enfoque de ciclo de vida	60
CAPITULO IV RESULTADOS	63
4.1 Resultados de caracterización del asfalto	63
4.1.1 Penetración	64
4.1.2 Punto de ignición de Cleveland.....	64
4.1.3 Punto de reblandecimiento	65
4.1.4 Ductilidad.....	65
4.1.5 Contenido mínimo de asfalto	65
4.2 Resultado de caracterización de pétreos.....	67
4.2.1 Cuarteo, peso volumétrico seco suelto (WVSS) y peso volumétrico seco varillado (WVSV)	68
4.2.2 Granulometría	69
4.2.3 Partículas alargadas y lajeadas	73
4.2.4 Desgaste de los ángeles.....	75
4.2.5 Densidad en gravas.....	75
4.2.6 Equivalente de arena.....	75
4.2.7 Absorción en gravas.....	76
4.3 Pruebas no destructivas	76
4.3.1 Velocidad de pulso ultrasónico	76
4.4 Pruebas destructivas.....	78
4.4.1 Método Marshall.....	78
4.4.2 Diseño Marshall.....	79
4.5 Elaboración de probetas.....	87
4.6 Flujo	91

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

4.7 Porcentaje de vacíos	93
4.8 Estabilidad	94
CAPITULO IV DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y ANALISIS	96
5.1 Discusión.....	96
5.2 Estabilidad, flujo y porcentaje de vacíos	96
5.3 VAM y VFA.....	97
CAPITULO V CONCLUSIONES	97
CAPITULO VI RECOMENDACIONES	99
AGRADECIMIENTOS	100
DEDICATORIA.....	101
REFERENCIAS	103
Tabla de Figuras	
Figura 1 indicador del INEGI, fuente: (INEGI, 2023).....	13
Figura 2 INEGI, unidades económicas que utilizaron materiales reciclados (Censos económicos, 2019)	14
Figura 3 ECOCE ¿Qué hacemos? (Juan Carrillo, 2020)	25
Figura 4 caucho procesado y molido (Reciclaje de Neumáticos, 2019)	30
Figura 5 composición de los neumáticos (Tires, 2013).....	30
Figura 6 Agregado grueso grava triturada, fuente propia	33
Figura 7 Mezcla asfáltica.....	36
Figura 8 Esquema de una instalación de pirolisis (Xavier Elías, 2012)	42
Figura 9 Flujo general del proceso de la metodología aplicada en la investigación, fuente propia	44
Figura 10 análisis de flujo de mezcla de procesos	45
Figura 11 Caucho molido tipo polvo retenido en la malla 60, fuente propia	48
Figura 12 Recolección de PET y corte en tiras, fuente propia.....	49
Figura 13 Prueba de penetración, fuente propia	50
Figura 14 Punto de ignición, fuente propia.....	51
Figura 15 Punto de reblandecimiento, fuente propia	52
Figura 16 Braguetas para enrase y prueba, fuente propia	52
Figura 17 cuarteo, fuente propia.....	53
Figura 18 Granulometría, fuente propia	54
Figura 19 Partículas alargadas y lajeadas, fuente propia	55
Figura 20 Desgaste de los ángeles, fuente propia	56

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

Figura 21 Densidad en gravas, fuente propia.....	57
Figura 22 Absorción en grava y sello, fuente propia	58
Figura 23 Equivalente de arena, fuente propia.....	59
Figura 24 Requisitos de calidad para mezclas asfálticas para nivel de tránsito bajo, Martillo Marshall. (Dr. Horacio Delgado Alamilla, 2020).....	60
Figura 25 Requisitos de calidad del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa, Fuente: (SCT, 2017)	63
Figura 26 Ubicación de banco de materiales Tres María, Fuente Google Maps	68
Figura 27 Banco de materiales la Joyita y obtención del muestreo de pétreos, fuente propia	68
Figura 28 Requisitos de Granulometría del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa, fuente Norma N-CMT-4-04-08.....	70
Figura 29 Gráfica de la granulometría densa para el diseño en mezcla asfáltica	73
Figura 30 Requisitos de calidad del material pétreo, fuente N-CMT-4-04-08	74
Figura 31 valores para mezcla asfáltica con granulometría densa.....	76
Figura 32 Prueba de pulso, Fuente propia	77
Figura 33Fuente: N-CMT-4-05-003/16, Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras	79
Figura 34 Porcentaje de vacíos para el rango del 4-6.5% de asfalto.....	82
Figura 35 Grafica del resumen del flujo para la adición de fibras de PET.....	85
Figura 36 Porcentaje de material usado para una mezcla asfáltica en caliente.....	87
Figura 37 Probeta con el 5.5% de asfalto para el 3% de PET	88
Figura 38Probetas convencionales, Método Marshall.....	89
Figura 39 Probetas con el 1.5% de PET probadas en método Marshall	89
Figura 40 Probetas con adición de polvo de caucho, probadas método Marshall	90
Figura 41 probetas con adición de fibras de PET probadas en método Marshall	91
Figura 42 Grafica del flujo con 5.5% de asfalto	92
Figura 43 Grafica de porcentaje de vacíos.....	93
Figura 44 Grafica de estabilidad con las tres mezclas de las probetas con el 5.5% de asfalto.....	95
Figura 45 Estabilidad con el 2% de fibras de PET y el 1 % de polvo de caucho	95
Figura 46 Vacíos en el agregado mineral, granulometría densa	97

Índice de tablas

Tabla 1 Referencia de composición del neumático con base a sus materiales.....	31
Tabla 2 Propiedades y características del asfalto.....	36
Tabla 3 Composición química del asfalto	40
Tabla 4 Comparación de los procesos de pirolisis	42
Tabla 5 Clasificación de probetas	47
Tabla 6 Penetración.....	64

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

Tabla 7 Prueba punto de reblandecimiento en asfalto.....	65
Tabla 8 Prueba de viscosidad para asfalto con grado PG 64-22	65
Tabla 9 Contenido mínimo de asfalto por el meto cuantitativo	66
Tabla 10 valores del método por fórmula para el contenido mínimo de asfalto	66
Tabla 11 Peso volumétrico seco suelto.....	69
Tabla 12 Granulometría arena para diseño de mezcla asfáltica en caliente	69
Tabla 13 Granulometría sello para diseño	70
Tabla 14 Granulometría gravas para diseño	70
Tabla 15 Integración de la muestra para el diseño de mezcla asfáltica en caliente ...	72
Tabla 16 Prueba de partículas alargadas	74
Tabla 17 Partículas lajeadas	74
Tabla 18 Densidad de grava	75
Tabla 19 Porcentaje de absorción en gravas	76
Tabla 20 Clasificación del concreto para prueba de velocidad ultrasónica	77
Tabla 21 Velocidad de pulso para probetas con adición de PET y caucho	78
Tabla 22 Peso material de probeta	80
Tabla 23 Diseño para las probetas Método Marshall	81
Tabla 24 Diseño Marshall con porcentajes del 5.5-6 % a cada 0.25	83
Tabla 25 Diseño Marshall con adicción del 1 % de polvo de caucho	83
Tabla 26 Resumen del flujo para la adición de polvo de caucho.....	84
Tabla 27 Diseño Marshall con adicción del 2 % de Fibras de PET	84
Tabla 28 Resumen del flujo con adicción de fibras de PET.....	84
Tabla 29 Resumen de estabilidad con adición de fibras de PET	85
Tabla 30 Resumen de % de vacíos para adición de fibras de PET	85
Tabla 31 Diseño Marshall con adición del 1% de polvo de caucho y el 2% de fibras de PET.....	86
Tabla 32 Resumen del Diseño Marshall con la adición de fibras de PET al 2 % y polvo de caucho al 1 %.	86
Tabla 33 Resumen del flujo	93
Tabla 34 Porcentaje de vacíos.....	94
Tabla 35 Resultados de la estabilidad	95

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

RESUMEN

Esta investigación está enfocada en la obtención de un incremento en la resistencia a la fatiga para la mezcla de cementante asfáltico con agregados pétreos y adición de PET y polvo de caucho, teniendo características principales como son la densidad, el porcentaje de vacíos, la granulometría, el flujo, etc. El realizar esta caracterización tiene como objetivo conocer los parámetros permisibles para su uso en carpetas asfálticas con $\Sigma \leq 10^6$ ejes equivalentes, para granulometría densa, que en ningún caso será menor de diez años.

El objetivo fue estudiar el comportamiento de la mezcla asfáltica con la adición de materiales reciclables en asfalto para pavimentos rígidos, bajo la norma N-CTM-04-03/16 basadas en la granulometría densa, a partir del análisis de artículos de investigación con un período no mayor a 5 años. Se dividieron en dos categorías: índices y propiedades físico-mecánicas.

Se realizaron pruebas de laboratorio para la caracterización de los materiales pétreos, adquiridos del banco de materiales conocido como “Joyitas” ubicado en la carretera Morelia - Quiroga, de igual manera que de la planta de asfalto CIECA se trajo el material donado por la empresa con un grado PG 64-22. De la misma manera se caracterizó el asfalto con pruebas de laboratorio, siendo comparadas con la ficha técnica, se realizaron las fibras de PET con material reciclado, con las medidas de 2 mm x 2.5 cm.

Teniendo la adición de fibras de PET respecto al peso de la muestra para realizar pastillas de mezcla asfáltica, en proporciones de 1-4 % tanto de PET como de polvo de caucho, dicho material en peso total del espécimen (940 gr). Finalmente se aplicó el método Marshall, con la valoración de resultados en gráficas y tablas para los valores de resistencia, así mismo para poder llegar a la conclusión correcta de la conveniencia de implementar estas mezclas en ligantes asfálticos.

PALABRAS CLAVE: asfalto, fatiga, PET, caucho, reciclado, residuos.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

ABSTRACT

This research is focused on obtaining an increase in fatigue resistance for the mixture of asphalt cementitious with stone aggregates and addition of PET and rubber powder, having main characteristics such as density, percentage of voids, granulometry, flow, etc. The purpose of performing this characterization is to know the permissible parameters for its use in asphalt binders with $\sum \leq 10^6$ equivalent axles, for dense granulometry, which in no case will be less than ten years.

The objective was to study the behavior of the asphalt mixture with the addition of recyclable materials in asphalt for rigid pavements, under the N-CTM-04-03/16 standard based on dense granulometry, from the analysis of research articles with a period no longer than 5 years. They were divided into four categories: void ratio and physical-mechanical properties.

Laboratory tests were conducted for the characterization of the stone materials acquired from the material bank known as “Joyitas” located on the Morelia - Quiroga highway, as well as from the CIECA asphalt plant, which brought the material donated by the company with a PG 64-22 grade. In the same way the asphalt was characterized with laboratory tests, being compared with the technical data sheet, PET fibers were made with recycled material, with measures of 2mm x 2.5 cm.

PET fibers were added to the weight of the sample to make asphalt mixture tablets, in proportions of 1-4 % of both PET and rubber powder, said material in total weight of the specimen (940 gr). Finally, the Marshall method was applied, with the evaluation of results in graphs and tables for the resistance values, to reach the correct conclusion of the convenience of implementing these mixtures in asphalt binders.

KEY WORDS: asphalt, fatigue, PET, rubber, recycled, waste.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

INTRODUCCIÓN

Los residuos que generamos a diario son un reflejo de las formas de producción y consumo constante de las sociedades en las que vivimos, durante los últimos años la producción de residuos sólidos urbanos ha crecido significativamente, originando un sin número de problemas en diferentes ámbitos, más sin embargo en el tema ambiental que en este nos compete y así mismo en el ámbito de la salud. Con el fin de proponer algunas alternativas para hacer frente a estos problemas, este trabajo presenta la investigación y el uso del reciclaje y reutilización de dos residuos sólidos urbanos mediante su incorporación a la mezcla asfáltica, en el diseño de la mezcla con la adición de dichos materiales, con el fin principal de su uso en pavimentos flexibles, los residuos estudiados fueron el hule molido de neumático (caucho) y tereftalato de polietileno (PET), presentando el mejor diseño de desempeño para la mezcla asfáltica en caliente.

La preocupación por el medio ambiente es cada vez más evidente en los ciudadanos, esto respecto a algunas de las áreas de la investigación y la contribución que se logra realizar en el medio ambiente, la difusión constante de información para el manejo y uso adecuado de productos con descomposición química de larga vida. En la ingeniería civil, así como en la ambiental, es conveniente buscar sustituciones, adiciones o innovaciones en los materiales de uso frecuente para mitigar el impacto ambiental; una opción sustentable para la reducción y contribución del medio ambiente es el aplicar el uso de residuos sólidos urbanos, así como su reciclaje o reutilización, en beneficio de la sociedad y el ambiente como tal.

Los residuos para utilizarse tienen una clasificación establecida y deben cumplir con ciertos parámetros de calidad y control, al ser incluidos hoy en día en procesos de construcción y como adición, se debe tener un buen diseño que logre cubrir las necesidades de durabilidad, textura, rugosidad, ciclo de vida y costo de manufactura - producción. Por lo cual su gestión debe adecuarse a los cambios que se producen en todos los ámbitos que le competen.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

La mezcla asfáltica es utilizada y producida a nivel mundial debido a sus buenas sollicitaciones, es básicamente la mezcla de dos componentes el aglutinante y los agregados. La pasta, compuesta de asfalto, esta se encarga de ser el adherente de los agregados, normalmente arena y grava. El estudio del asfalto nos ayuda a poder adicionar materiales no convencionales a las mezclas, determinando así su comportamiento en estado fresco y posteriormente endurecido, más sin embargo en esta investigación se efectuó solo para su estado endurecido.

La técnica de adición del PET y el caucho a una mezcla de asfalto, básicamente consiste en adicionar un porcentaje de dicho material que conformaran la masa de la mezcla, esta modificación se realiza por dos razones: la primera es innovar en el campo de la ingeniería adicionando materiales que son producto del reciclado, a un costo y producción reducido; la segunda, conservar por más años los bancos de los materiales que generalmente se utilizan, de esta forma se mitiga y se ayuda al medio ambiente con una reducción de desgaste y desalojo de material pétreo; por tal razón, el objeto de estudio de esta investigación está ligado a la determinación de la cantidad de porcentaje de las fibras de PET y el polvo de caucho, definiendo así, el comportamiento en estado endurecido al efectuar las pruebas pertinentes para el método Marshall.

Los desechos plásticos son el producto de una sociedad con un cambio en sus usos y costumbres; todo esto genera grandes cantidades de residuos de poliestireno expandido. Por otro, lado la generación de los neumáticos y sus características, como: su alta durabilidad, ligereza, resistencia a la compactación, entre otras, las consecuencia de la demanda del consumidor deja a diario una cantidad de neumáticos inservibles a la intemperie, siendo así, una consecuencia de riesgo ya que los convierte en productos poco degradables generando la acumulación en sitios de disposición final, como tiraderos a campo abierto, a orillas de cauces, en quemas clandestinas, en recicladoras de neumáticos se llega a presentar que pronto llegan a su capacidad máxima de servicio debido al gran volumen que ocupan dichos residuos sólidos.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

El manejo de los residuos es el conjunto de acciones y procedimientos que tienen por objeto el adecuado transporte, un uso, almacenamiento y disposición final, donde cabe destacar que este debería de ser el caso para cada uno de los residuos urbanos, más sin embargo no siempre es el método ni la condición en la que terminan estos, para ello se requieren medidas de prevención de contaminación, acumulación, deterioro, entre otros, para que los residuos lleguen a un lugar de disposición final adecuado, bajo la NOM-083-SEMARNAT-2003, cumpliendo las especificaciones y requisitos de protección ambiental que establece la Norma Oficial Mexicana y la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.

En México, en la actualidad, se ha incrementado la generación de residuos sólidos urbanos, esto debido a la gran concentración de la población en la ciudad, así mismo en las zonas urbanas y las diferentes actividades económicas realizadas en estas zonas por los seres humanos. Cabe mencionar que el estado en el que se genera la mayor cantidad de residuos sólidos es el estado de México, se tiene establecida una planta de tratamiento y separación de residuos, dichos residuos con un total de 365,622 toneladas anuales, según el registro que nos presenta el INEGI, entre las cuales principalmente se encuentran los residuos de polietileno de tereftalato. El INEGI, a través del SMA (Sistema de Manejo Ambiental), busca propiciar el cumplimiento de la legislación y la normatividad ambiental aplicables a los programas, las estrategias y los procedimientos que mejoren su desempeño ambiental. (INEGI, 2023)

Por lo tanto, para la ejecución del censo del 2022, se determinaron de manera puntual que los siguientes indicadores de referencia son los que mejor se acoplan para su clasificación y consumo, que se muestran en la tabla representada con la figura número 1:

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

Indicador	Valor	Referencia
Consumo de energía	Índice máximo de consumo de energía eléctrica	Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (Reglamento AEE 2020-2024)
Consumo per cápita de agua	24 litros por persona por día	Consumo histórico en los inmuebles del Instituto a nivel nacional
Consumo per cápita de hojas	12 hojas por día	Consumo histórico en las oficinas del Instituto a nivel nacional
Generación per cápita de residuos sólidos urbanos	0.070 kilogramos por día	Generación histórica en los inmuebles del Instituto a nivel nacional

Figura 1 indicador del INEGI, fuente: (INEGI, 2023)

En el año de 2022 hubo un alza al incremento en México de manera bastante significativa y sobre todo es algo alarmante de al menos un 53 % en la generación de los Residuos Sólidos Urbanos, dicho informe es en comparación con el 2021, por lo que se refiere a que es un equivalente a 67 164 kg de residuos anuales.

- El mundo al año esta produciendo aproximadamente 300 millones de toneladas de residuos plásticos urbanos, esto con base a los registros de los censos realizados.
- De todos los desechos plásticos que se van produciendo, se tiene que solo el 9% se puede considerar que ha sido reciclado, o procesados para un uso extra al que fueron inicialmente realizados, cabe destacar que esto es desde nuestra historia en el planeta, por lo que es muy alarmante ya que somos los principales generadores de residuos.
- Se tiene la estimación de que alrededor del 90% de los animales marinos han consumido y/o tenido ingesta del plástico por al menos una vez en su vida, dichas cifras son calculadas con respecto a las muertes y bajas de producción animal que se generan anualmente.
- En México, tenemos la dicha de que habitan seis de las siete especies de tortugas marinas, que se tienen en registro, de las cuales podemos

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

decir que una de cada tres muere por la principal causa extrema del plástico en los mares, ya sea por consumo o quedar inmóviles por ellos.

Así podríamos llegar a enumerar muchos de los problemas que causan a diario los plásticos en nuestra vida cotidiana, tanto a los seres humanos, como a los ecosistemas, sin saber que la magnitud del daño es irreversible en muchos de los casos, por ello debemos de ser más conscientes al llegar a adquirir estos productos y poder darles un uso y final oportuno, ya que son de muy fácil adquisición y su descomposición molecular puede llegar a tardar entre los quinientos y mil años, por ello se pide ser más consciente en lo que consumimos.

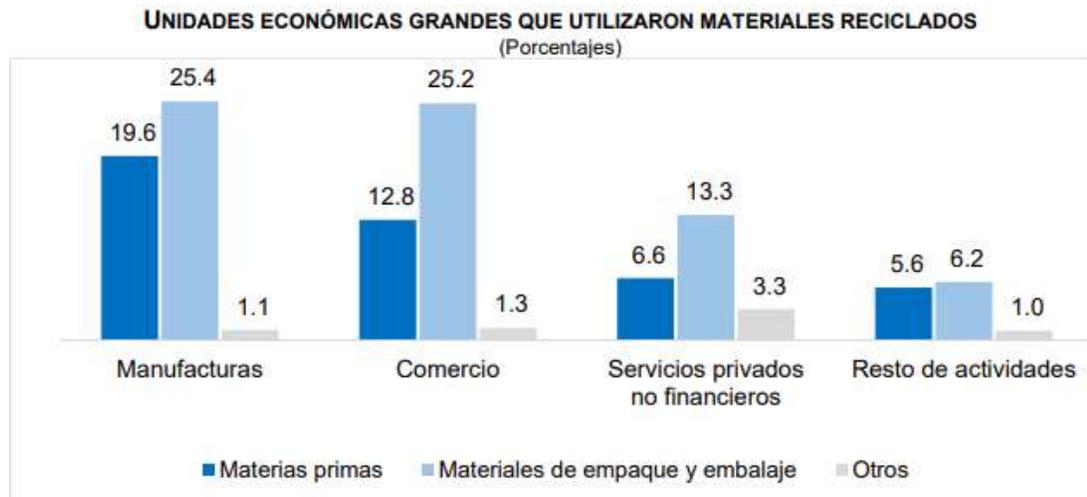


Figura 2 INEGI, unidades económicas que utilizaron materiales reciclados (Censos económicos, 2019)

De las unidades económicas más grandes que cuentan en el sector del comercio que declaró en el año la separación constante de los residuos y desechos, solo se tiene que el 94 % lo separó con el concepto de residuos y desechos de papel y cartón, con un 80.1 % todos aquellos con el concepto de residuos y desechos de plástico, con un 43 % los residuos y desechos metálicos y, por último, se generó un 40 % declaró separar los residuos y desechos de vidrio. (INEGI, 2022)

Para (Kabir Oyeyi et al., 2023) menciona que, en la actualidad, debido al desarrollo constante de la industria automotriz, cada día esta siendo un incremento

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

potencial ya que a la vez existe una mayor cantidad de desecho de neumáticos, causados por los usuarios de los cuales se han convertido en un problema urgente que se debe solucionar de manera pronta para mitigar el problema ambiental ya que genera causas muy graves de contaminación, así como efectos mayores a la salud, por mencionar algunas.

Así mismo para (Salazar P. S., 2019), menciona que las mezclas asfálticas son de gran importancia para todas y cada una de las regiones que están creciendo, a lo largo de las épocas, la gran demanda de vehículos que se tienen en consideración por moda, acceso o comodidad de los usuarios y el desarrollo del país depende de la construcción de carreteras, por lo tanto, el uso constante de asfaltos modificados permite innovar, la incorporación incrementa las propiedades mecánicas y físicas del pavimento flexible beneficiando a la reducción de gases tóxicos, de efecto invernadero y busca que tengan una vida sostenible.

Su importancia de la aplicación de pavimentos flexibles en nuestro país radica en que al rededor del 85% de las carreteras están hechas con los diversos tipos de asfalto, por ello es un gran objetivo tener nuevas alternativas para futuras construcciones, ya que la RNC (Red Nacional de Caminos) contiene 178 216.89 km de carreteras en México, por lo que son un indicador potencial de los recursos de vías de transporte más usados. (Red Nacional de Caminos, 2023)

CAPITULO I INTRODUCCIÓN

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento del problema

Se sabe que la implementación de productos reciclados y/o reutilizables a la industria de la construcción hoy en día, es una fuente de abastecimiento e implementación importante, ya que nos conlleva a la mejora de dichos productos, aunado a ello a un incremento de propiedades, ligado a darle una segunda vida útil a los residuos, sin embargo, aún estamos escasos de muchas técnicas, así como de maquinaria, información y métodos nuevos para realizar todo este tipo de

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

adiciones, sustituciones e innovaciones en la industria de la construcción, así como en el campo del medio ambiente y sus efectos, para la reducción eminente de sus efectos como lluvia acida, contaminación visual, contaminación del aire, entre otros.

Cabe destacar que es un tema de gran amplitud y de mucho interés ya que la huella de carbono que representan estos productos en el mundo, es mucho mayor cada vez, se debe de dar conocimiento a la población de sus efectos secundarios al no ser procesados ni biodegradables, ya que se deberá de considerar que el caucho tarda alrededor de 50 años en degradarse, en cuanto al PET tarda alrededor de 450 años, por todos estos efectos causados en su ciclo de vida de manera inconsciente o consciente, respectivamente ya que en algunos casos la falta de cultura o conocimiento nos hacen negarnos a los cambios, permanecer con los hábitos que se nos inculcaron desde nuestro nacimiento y no permitir que se nos dictamine un nuevo hábito, para evitar salir de nuestro estado de confort o llegar a cometer errores en el proceso de su uso, al efectuar estas implementaciones estamos ayudando a reducir la cantidad de gases emitidos a la atmósfera así como daños a la salud, desgaste de energía renovable y no renovable, entre otros.

Para ello se propuso este trabajo de investigación ya que, al colaborar de manera amable y amigable con el medio ambiente, se disminuye de manera aceptable la contaminación, contribuyendo de forma responsable y eficaz con nuestro medio ambiente. Dicha solución es adicionar en las mezclas de asfalto en caliente la cantidad adecuada y necesaria para que las fibras de PET y el polvo de caucho sean un ligamento de ayuda para el aumento de la resistencia por fatiga de nuestra mezcla al ser probados en el método Marshall y analizados los resultados de dichas pruebas y método.

1.2 Justificación

La necesidad de la reducción y disminución de uso de algunos de los productos que son a diario desechados por los seres humanos, de manera poco consciente. Dejando de lado la posibilidad de un uso adicional para el que estaban

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

hechos inicialmente. Al ser materiales reutilizados tiene como consecuencia positiva una contribución al medio ambiente, en este caso, al reutilizar dos elementos muy importantes que generan contaminación ambiental de manera impactante para nuestro planeta, contribuyendo como sociedad en una reducción óptima con el uso de los materiales seleccionados como lo son las fibras de PET y el polvo de caucho, ya que se les dará un nuevo funcionamiento para verificar la interacción con la mezcla asfáltica.

Es así como, una carpeta asfáltica realizada con adición de PET reciclado proveniente de las botellas de plástico y caucho en polvo, proveniente de los neumáticos, se presenta como una solución sostenible en la construcción de carreteras y otro tipo de caminos. Esta alternativa se da en la búsqueda de nuevas tecnologías con mayor durabilidad, una mejora en la resistencia y aunado a ello menores costos a largo y corto plazo de inversión, además, de proteger el medio ambiente mitigando una reducción de gases a la atmosfera, como parte de dicho procedimiento.

Es posible tener una alternativa aceptable, si se mejora la resistencia a la fatiga de una mezcla asfáltica ecológica con la adición de materiales reciclados, al 1, 2, 3 y 4 %, tales como son las fibras de PET y el polvo de caucho.

Considerando las nuevas alternativas para la elaboración de mezclas asfálticas con materiales alternativos tales como el caucho y polietileno que son los principales residuos sólidos llegando a perjudicar al medio ambiental, proyectando una mejor utilización de estos, teniendo la perspectiva desde una idealización ambiental y disminución de la afectación en la zona del 3.67% de estos materiales.

1.2.1 Justificación practica o social

La presente investigación se justifica en la necesidad de obtener una mezcla asfáltica en caliente con una adición de fibras de tereftalato de polietileno (PET), con polvo de caucho reciclado que presente un comportamiento aceptable de similar performance y óptimo diseño en relación a una mezcla asfáltica convencional,

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

siendo así que se le adicionen ambos productos a la mezcla convencional, con la reutilización de dos productos que se convertirán en un residuo, el PET y caucho; además, se buscó que el costo de la producción no sea tan variable respecto a la mezcla convencional.

Para neumáticos con caucho asignados para los camiones y vehículos industriales, la reducción media es del 69,1%, lo que en términos absolutos supone evitar la emisión a la atmósfera de 234,3 kg de CO₂ por neumático. (Reciclaje de Neumáticos, 2019) 282.56 kg de CO₂ 10 años de vida.

1.2.2 Justificación técnica

Elaborar un diseño de mezcla asfáltica ecológica en caliente usando polietileno de tereftalato reciclado en fibras y polvo de caucho de neumáticos, que cumpla con la normativa activa; rescatando los mejores métodos utilizados, generando la facilidad de comprender, elaborar y llegar a duplicar cuantas veces sea necesaria la misma técnica en la zona de estudio.

1.2.3 Justificación ambiental

Considerando algunas de las nuevas alternativas que se tienen hoy en día para la elaboración de mezclas asfálticas con materiales alternativos tales como el caucho (en polvo, granos, rayadura, hojuelas) y plástico (PET en hojuelas, escamas, triturado y fibras) que son los principales residuos sólidos de la investigación, perjudicando al medio ambiental, de manera indirecta proyectando una mejora en la aplicación y la utilización de estos, así como reduciendo de manera efectiva su pérdida.

1.3 Delimitaciones

1.3.1 Espacial

La investigación se desarrolló para el área de la ciudad de Morelia, Michoacán; no obstante, los ensayos correspondientes se realizaron en el laboratorio de asfalto de la Universidad Michoacana de san Nicolás de Hidalgo,

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

correspondiente al laboratorio “Ing. Luis Silva Ruelas”, ubicándose en ciudad universitaria, edificio F. General Francisco J. Múgica, Morelia, México.

1.3.2 Temporal

La investigación se realizó durante un periodo de dos años, abarcando los meses de septiembre del año 2022 al mes de agosto del año 2024.

1.3.3 Económica

Los gastos de la investigación fueron asumidos en responsabilidad en su totalidad por el tesista, en base fundamental al apoyo de la beca otorgada por CONACYT, así como el apoyo brindado en todo momento por el laboratorio de asfaltos de la universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, con el efecto de poder ejecutar las pruebas y por último con apoyo del asesor de Tesis el Dr. Luis Hugo Chávez García.

1.4 Limitaciones

No se contó con el equipo para la realización de la prueba de nombre Rueda Cargada de Hamburgo, por no contar con equipo correspondiente en el laboratorio; no obstante, se realizó la petición a un laboratorio externo, más sin embargo no se logró tener respuesta asertiva para efectuar la prueba por tiempo y trabajo externo del mismo: principales ensayos establecidos por la normativa de la Secretaria del Transporte y Comunicaciones (SCT), siendo los mínimos requeridos para determinar el comportamiento de la mezcla asfáltica en caliente, ni contar con los moldes para efectuar las probetas, no se logró generar ningún tipo de resultados en la prueba de irrisistibilidad eléctrica ya que al no poder someterse a 24 horas sumergidas en agua, se aplicó en seco la prueba y no efectúa resultados, la muestra debe de estar sumergida en agua por 24 horas, sin embargo, uno de los factores más importantes para que las mezclas asfálticas tengan una disgregación es el fluido hídrico, su mayor problemática. La investigación se desarrollará solo para pavimentos flexibles, con un $\sum \leq 10^6$ de ejes equivalentes, de 8.2 toneladas de ejes

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

equivalentes, con un diseño para granulometría densa, en la ciudad de Morelia, Michoacán.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Determinar el comportamiento de la mezcla asfáltica en caliente, en su estado endurecido utilizando una adición de fibras de PET y polvo de caucho en distintas proporciones, partiendo del 1% propuesto.

1.5.2 Objetivos específicos

Para la investigación de este trabajo estaremos tomando en cuenta los objetivos de manera específica para llegar a resultados más concretos y reales dentro del tiempo de investigación, análisis y pruebas, siendo los siguientes:

- Determinar las características que deberá cumplir las fibras de PET y el polvo de caucho que se utilizará por porcentajes en las distintas mezclas de asfalto.
- Diseñar una mezcla de asfalto sin la utilización de fibras de PET y polvo de caucho, la cual servirá como forma de comparación para los diseños donde se emplee el agregado de las fibras de PET y el polvo de caucho en adición.
- Diseñar mezclas de asfalto, considerando la combinación de grava, arena, sello, PET y caucho en distintas proporciones; manteniendo fijo el tipo de asfalto, relación del agregado grueso o fino, según sea el caso.
- Analizar las mezclas asfálticas modificadas con fibras de PET y polvo de caucho principalmente en el punto de vista técnico y ambiental.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

CAPITULO II REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

2.1 Antecedentes

2.1.1 Antecedentes internacionales

Berrío nos menciona en su tesis titulada “Diseño y evaluación del desempeño de una mezcla asfáltica tipo MSC-19 con incorporación de tereftalato de polietileno reciclado como agregado constitutivo”, estableció principalmente su objetivo en llegar a diseñar una mezcla asfáltica semidensa de tipo MSC-19, con la cual le daría una incorporación de partículas de plástico reciclado, dicho material estaba fungiendo la finalidad de un agregado adicional para llevar a cabo la evaluación de las propiedades mecánicas y desempeño, su objetivo fue el enfocarse en realizar un diseño de manera tradicional por el método Marshall, para tener un control de los parámetros mecánicos y volumétricos, de diversas dosificaciones y tamaños de PET dentro de la mezcla asfáltica, posterior a cumplió con la tarea de realizar todas y cada una de las pruebas que requería para el método, obteniendo el 1 % de PET con tamaño inferior a 2 milímetros. De acuerdo con los ensayos realizados obtuvo como resultado de estabilidad 1367.9 kg, en el flujo 3.4 mm, teniendo en general un incremento de 37 % en el módulo resiliente y una disminución de 24 % en la velocidad de deformación plástica, lo cual lo hace menos probable de ser susceptible a fenómenos de ahuellamiento, llegando finalmente a la conclusión que el PET triturado, nos genera una incidencia de manera positiva en el desempeño de la mezcla asfáltica en caliente. (Berrío Álzate, 2017)

Por otro lado Esther, menciona en el Perú los pavimentos asfálticos tienden a tener figuraciones las cuales generan una gran disminución respecto a su vida útil, consecuente a ello se incrementa el costo de mantenimiento y adquisición para la obra de vías terrestres, aunado a ello para mejorar este aspecto se tiene que conocer los componentes, un mal diseño de mezclas asfálticas genera problemas que alteran sus propiedades que traen consigo deformaciones, para ello propone el agregar polvo reciclado de caucho como materia prima para las mezclas asfálticas

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

obtenidos de la trituración con un costo bajo y una aportación al medio ambiente. (Esther Pinedo, 2019)

De los antecedentes encontrados en las diferentes bases de datos, se muestra que predominan aquellos que aplican caucho reciclado como reemplazo del agregado fino y del volumen total de los agregados; tomando una relación promedio de 0.5%, como un valor óptimo que garantiza altas resistencias. Se recomienda que el reemplazo del material no debe ser mayor al 10%, para sustitución como agregado fino o grueso. (Sierra Rodríguez, 2020)

Naranjo estudió las propiedades reológicas, de resistencia a fatiga y deformación permanente de mezclas asfálticas finas con adición de PET en porcentajes por peso de asfalto de 4%, 6% y 10%, con tamaños entre 0.075 y 1.18 mm triturados y cribados. Los estudios mostraron que el módulo dinámico disminuía a medida que aumentaba el porcentaje de PET para una temperatura de 25 °C. Naranjo afirma que “En general, las mezclas asfálticas finas modificadas con PET son más susceptibles a la deformación permanente”. Asimismo, los ensayos de fatiga realizados en el reómetro en condiciones de deformación angular controlada mostraron que la vida a la fatiga medida como el número de ciclos requeridos para que el módulo inicial disminuyera en un 50%, aumentaba para porcentajes de PET inferiores al 6% por lo que recomienda usar este tipo de porcentaje en las investigaciones posteriores. (Juan Gabriel Naranjo González, 2019)

2.1.2 Antecedentes nacionales

Corbacho (2019) en su tesis titulada “Análisis de la estabilidad Marshall y la deformación permanente mediante el ensayo de Rueda Cargada de Hamburgo de una mezcla asfáltica modificada en caliente con fibras de tereftalato de polietileno reciclado en la 25 ciudad del Cusco - 2018”, consideró verificar la estabilidad Marshall y la deformación permanente mediante el ensayo de rueda cargada de Hamburgo con reemplazo parcial de agregado fino por fibras de tereftalato de polietileno reciclado (PET), primero realizó el análisis granulométrico de los materiales pétreos, a partir de las proporciones de agregados obtenido, sustituyó el

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

agregado fino por fibras PET en 0.2% en cada una, procediendo con el diseño mediante el método Marshall obteniendo así el contenido óptimo para la mezcla asfáltica y luego procedió a modificar la mezcla adicionando fibras de PET por sustitución de agregado fino en vía seca con el fin de obtener el contenido óptimo de fibras de PET. Después, realizó el ensayo de rueda cargada de Hamburgo con el fin de determinar el comportamiento ante ahuellamiento y susceptibilidad a la humedad de las mezclas asfálticas. Como resultados, obtuvo que el porcentaje óptimo de asfalto en la mezcla convencional y modificado fue de 6.15 %, obteniendo una estabilidad de 938 kg y flujo de 13.8 (0.25 mm) y un contenido de fibras PET de 1.2 %, con estabilidad de 856.3 kg y un flujo de 14.7 (0.25 mm); asimismo, detalla que la estabilidad de la mezcla asfáltica modificada disminuye en 9.6 % en relación con la mezcla asfáltica convencional y el flujo se incrementó en 6.52 % también en relación con la mezcla convencional. (De et al., 2019)

Para Soares, respecto al trabajo que nos presenta de investigación por una población específica, sin embargo, la muestra estuvo conformada por 60 ensayos, de las cuales 45 correspondientes a las mezclas modificadas con el agregado de polímeros (con 1,2 y 3%) y 15 a mezcla asfáltica convencional. Llego a ejecutar el método Marshall para determinar culminar con los parámetros de flujo y % de vacíos. Los resultados se estimaron en base a la prueba, para los siete indicadores. De dichos indicadores halló que, el índice de rigidez, el flujo, la estabilidad y el % de VMA tuvieron un aumento inferior al nivel de riesgo (<0.05), confirmando la hipótesis de diferencias; es decir, existió diferencias significativas entre el diseño de mezcla convencional y la modificada teniendo así una investigación asertiva, (Soares, 2002)

2.2 Generalidades

Los residuos se encuentran en nuestro planeta desde antes de que existieran en ella los seres vivos, dicho suceso es aproximadamente cuatro mil millones de años. Anteriormente, no era un tema de preocupación inminente ya que la Tierra contaba con una inmensa extensión territorial donde la población y sus desechos

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

eran una minoría, en base a como han pasado los años estos han ido incrementado en forma piramidal, y en los últimos años en forma exponencial, generando un aumento alarmante, la problemática de los residuos se genera su auge con el desarrollo de la sociedad moderna en la que vivimos, no sólo en el aspecto referido a la cantidad de residuos sólidos que ésta genera (difícilmente asimilable por la naturaleza) si no por la vida tan acelerada y rutinaria que tenemos hoy en día en un 80% los seres humanos.

Actualmente, el manejo de los desperdicios o desechos plásticos representa un gran desafío para la sociedad. México no es la excepción, puesto que cada mexicano usa en promedio dos kilos y medio de plásticos al mes, es decir 30 kilos al año en promedio, equivalente a 42 botellas de refresco de 2 litros, lo que equivale a un millón de toneladas por año de plásticos del que solo se recicla un porcentaje muy bajo, ya que no tenemos muchas empresas aun destinadas y dedicadas en México con este tipo de relación, se tienen 32 plantas de la empresa ECOCE, mas no son suficientes para poder procesar todo el material mientras que el PET restante termina siendo acumulado en los rellenos sanitarios o contaminando valles, montañas y ríos.

Las plantas de tratamiento y procesamiento con las que cuenta la empresa de ECOCE, siendo una asociación civil ambiental, que fue creada principalmente y auspiciada por empresa productora de bebidas y alimentos, que son de clase comercial en nuestro país. Cuentan actualmente con una cantidad de 32 plantas de tratamiento para reciclaje y reutilización de botellas de PET y otros residuos, en la Republica, por ello se menciona que es una gran aportación al beneficio de los pobladores, ya que constantemente está en actualizaciones y manejo de material de reciclaje.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”



Figura 3 ECOCE ¿Qué hacemos? (Juan Carrillo, 2020)

Por diversas razones, como lo han sido la falta de conocimiento, la constancia de la actualización e información, la insuficiencia de los recursos económicos, las presiones políticas o simple descuido de la sociedad, de las autoridades y en general han pretendido resolver este problema quitando los residuos sólidos urbanos de la vista, arrojándolos a las afueras de las ciudades, a las barrancas, los cauces de los ríos, lagos o en el mar, rellenos sanitarios u ocultándolo mediante enterramiento en terrenos poco adecuados para su descomposición por falta de lineamientos de construcción de dichos tiraderos. (Secretaria de Urbanismo y medio ambiente., 2008)

Tenemos que un residuo es un material o producto cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentra en estado sólido, líquido o gas contenido en recipientes o depósitos y que puede ser susceptible de ser valorizado o requiere sujetarse a tratamiento o disposición final, incluyendo ciertos procesos para su disposición final. (Cámara de diputados del H. consejo de la unión, 2015)

Ahora, si hablamos en específico de las botellas de plástico, conocidas comúnmente como PET o de material de polietileno de tereftalato, se menciona que el PET representa un 2.32% de un total de 528,961 t/año, de botellas plásticas las cuales no son recicladas y se convierten en desechos que terminan estas en orillas

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

de arroyos, causes, coladeras, baldíos, tiraderos al aire libre, entre otros, sin ser recicladas de una manera congruente y reutilizadas para una función extra de la que fueron hechas por primera instancia. Se calcula que el valor potencial del mercado de reciclaje de PET asciende a una cantidad de los \$700 millones de dólares anuales en todo el mundo, mientras que el valor actual de la industria de reciclaje de PET en México se calcula en \$44 millones de pesos. (Rodríguez L. & Olán-Acosta, 2022)

2.3 Antecedentes del PET (Tereftalato de polietileno)

Para la elaboración del plástico son diversos los procesos dependiendo del tipo que queramos conseguir, en el caso de las botellas de plástico, se emplea el tereftalato de polietileno (PET), ya que es el material más utilizado para fabricar botellas de plástico, desde el año 1976, producto que se obtiene de los hidrocarburos, siendo este producto del petróleo, todo este proceso conlleva que se emitan gases de efecto invernadero poco controlados en la actualidad y generan de igual manera lluvia acida, con afectaciones de manera visual, física, de salud y ambiental, por mencionar algunas.

Al usar polímeros elastómero termoplástico sintético en mezclas en caliente se considera que es recomendable para las capas de rodadura de ejes equivalentes, pero en mezclas en frío al ser colocadas en obra estas dejan espacios entre las partículas, ya que la emulsión asfáltica que contiene agua se evapora a la intemperie. (Rodríguez L. & Olán-Acosta, 2022)

Los plásticos o polietileno representan el 11% de los residuos sólidos urbanos en México. El PET es uno de los materiales más utilizados dentro de la industria embotelladora de bebidas, debido a su durabilidad, teniendo una resistencia química, bajo peso y adecuada capacidad de disipación de energía ante la aplicación de fuerzas externa, entre otras, debido a esto se posiciono en el tercer lugar en el consumo de plástico más usado en México, (Chong-Qing Wang, 2015).

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

Es útil distinguir entre el reciclaje de materiales secos y orgánicos húmedos. Para la mayoría de los materiales secos encontramos comúnmente desechos como metales, vidrio, papel, plásticos y textiles para estos existen cadenas de valor industrial bien establecidas.

El PET se considera un termoplástico de alta calidad, químicamente pertenece a la familia de los poliésteres, cuya principal característica es la presencia de enlaces tipo éster. Se constituye por etileno y tereftalato. (Ávila Córdoba et al., 2013)

Los países deben cumplir políticas proactivas que fomenten la minimización de los desechos y el reciclaje, los productores deben estar involucrados en la gestión de todo el ciclo de vida de sus productos, es conveniente tratar los recursos y residuos, como una manera en dar la baja a los costos de eliminación de residuos y obtener beneficios adicionales de las materias primas recuperadas, alentar a un cambio en el pensamiento sobre los desechos como amenaza para la salud y el medio ambiente, hacia un concepto más amplio de gestión de los recursos. (Rosas Baños & Gámez Anaya, 2019)

Existen trabajos de incorporación de variantes en porcentaje desde el 1% y hasta el 30% de PET, de un 15% de poliestireno, mezclas con dos modificantes manteniendo el poliestireno con 1% y variando la cantidad de caucho molido o en ralladura desde 12, 14, 16,18 y 20%(Figuroa Infante & Fonseca Santanilla, 2020), así como la adición de caucho en fibras dentro de la granulometría del diseño de la mezcla asfáltica (Alba Cristina Vides, 2013)

2.4 PET

El desarrollo de tecnologías para el reciclado de plásticos inicio a principios de 1970, debido al aumento en los costos del petróleo y desabasto de materias primas. El reciclaje de plásticos se puede hacer a través de tres métodos: Reciclaje físico o mecánico, reciclaje químico o terciario y reciclaje energético o cuaternario.

Al usar polímeros elastómero termoplástico sintético en mezclas en caliente son recomendables para las capas de rodadura de 8.2 ejes equivalentes, pero en

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

mezclas en frío al ser colocadas en obra estas dejan espacios entre las partículas, ya que la emulsión asfáltica que contiene agua se evapora a la intemperie. (Rodríguez L. & Olán-Acosta, 2022)

El PET se considera un termoplástico de alta calidad, químicamente pertenece a la familia de los poliésteres, cuya principal característica es la presencia de enlaces tipo éster. El PET se constituye por grupos etileno y tereftalato. (Ávila Córdoba et al., 2013)

El PET es fabricado de la mezcla de petróleo, gas y aire, este se puede componer con 64% de Petróleo, 23% de gas natural y 13% de aire. Con el Petróleo crudo, se puede extraer el paraxileno el cual pasa por un proceso de oxidación con la acción del aire juntos producen ácido tereftalato. Para el etileno se produce de los derivados de gas en modo natural, que lo oxida al ser expuesto al aire y forma etilenglicol. El PET se conforma al combinar el etilenglicol junto con el ácido tereftalato mediante un proceso industrial. (Bolaños Zea, 2019)

2.5 Marco conceptual

2.5.1 Caucho

Tipo de látex extraído de un árbol denominado hevea brasiliensis, mediante proceso químico, con ayuda de maquinaria, el cual es materia prima para la producción masiva de caucho natural, este látex que contiene poli isopreno también contiene muchas partículas de suciedad, materia volátil, lípidos, cenizas, bacterias entre otros los cuales llegan a ser eliminados por el proceso de centrifugado en su descomposición.

Debido al creciente número de vehículos a nivel mundial se ha generado una mayor disposición de neumáticos que llegan al final de su vida útil, esto a causa de la comodidad y seguridad que requiere el usuario para poder transitar de una ciudad a otra, o por distancias largas en su zona, dicha situación nos lleva generando una fuerte problemática debido al volumen.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

Esto es una potencial amenaza para la salud humana, además de que los sitios donde estos se disponen generan plagas de mosquitos, acumulación de bacterias que llegan a ser dañinas para la salud de todos los seres vivos y son susceptibles a incendiarse produciendo una tremenda contaminación a la atmosfera, con consecuencias graves por la cantidad de CO₂ que estas dejan fluir en el ambiente.

Para (Gambino Martínez et al., 2023) menciona que, en la actualidad, debido al desarrollo constante de la industria automotriz, cada vez existe una mayor cantidad de desecho de neumáticos de caucho los cuales se han convertido en un problema urgente que se debe solucionar para mitigar el problema, ya que las afectaciones son cada día más alarmantes para la sociedad.

Las características inherentes de los neumáticos se pueden ver como ventaja o desventaja desde el punto de vista como productos de consumo o posterior a la vida útil. Como producto de consumo es resistente a la humedad, retrasa el desarrollo bacteriano, resistente a la luz solar, rayos ultravioletas, algunos aceites, ácidos y otros productos químicos. Las características físicas incluyen su no biodegradabilidad, no toxicidad, el peso, forma y elasticidad; sin embargo, muchas de estas son un problema para el ambiente que actualmente no se han terminado de evitar. (Retama Velasco & Heras Cruz, 2022)

Un neumático convencional está compuesto de tres partes principales:

- Compuesto elastomérico
- Tejido
- Acero

El neumático, químicamente está compuesto por caucho, perteneciente al grupo de polímeros, todos basados en hidrocarburos, con fibras entrelazadas de acero.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”



Figura 4 caucho procesado y molido (Reciclaje de Neumáticos, 2019)

Debido a las problemáticas presentadas y buscando alternativas positivas para el aprovechamiento de estos residuos, se han hecho diversos estudios para revalorizar los residuos. Diversos autores han aportado resultados respecto al uso de residuos sólidos proponiendo los neumáticos que llegan al fin de su vida útil como combustibles para procesos de conversión térmica, biodegradabilidad, (Machin et al., 2017) entre otras de las alternativas esta como aditivos para mezclas haciendo modificaciones, adicionando polímeros y caucho, obteniendo como resultado que estas modifican las propiedades de las mezclas de manera geológica, mecánica y física en diversos casos, (W.C. Tang H. C.).

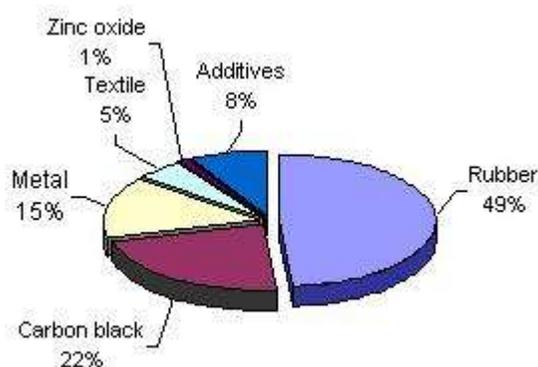


Figura 5 composición de los neumáticos (Tires, 2013)

La composición de los neumáticos con base a sus materiales se describe en la siguiente tabla, para un mejor entendimiento:

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

Tabla 1 Referencia de composición del neumático con base a sus materiales

Compuesto	Porcentaje masa
Caucho natural	29.59
Caucho estireno butadieno	29.59
Negro de humo	29.59
Acido estearico	0.59
Oxido de zinc	2.96
Resina fenolica	2.37
Azufre	0.89
Aceite aromatico	2.37
Aditivos y antioxidantes	2.05
	100

Fuente: (Augustine, 2013)

Dependiendo del uso de los neumáticos, llegan a variar en tamaño y diseño, la marca que los produce es también un factor importante, sin embargo la composición química, la materia prima de la fabricación del caucho es muy similar.

2.5.1.1 Desventajas del caucho

Principalmente debemos saber que todos los productos que utilizamos en un proceso de construcción, ya sea el caso de manera natural, mineral, artificial, estos conllevan a tener desventajas en algunas situaciones, pero aunado a ello también cuentas con ventajas, simplemente se debe de valorar el producto desde ambos casos para corroborar nuestra certeza en la utilización de él.

Algunas de las más importantes, hablando de desventajas del polvo de caucho son:

- Generación de gases
- Textura suave
- Enlace químico de hidrocarburos
- Poca resistencia al calor
- Se hincha fácilmente
- Fácil de envejecer al aire libre
- Alto poder calorífico

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

- Materiales pesados presentes en su composición
- Tiempo de vida
- No es biodegradable

2.5.1.2 Ventajas del caucho

No se puede dejar de lado que las ventajas con las que cuenta el material del caucho son para nuestra investigación muy útiles ya que estas pueden ayudar de manera efectiva para tener una mejor en la resistencia a la fatiga, se mencionan algunas de las ventajas con las que cuenta este producto:

- Buena elasticidad
- Resistencia acida y alcalina
- Resistente a ciertos aceites
- Alta resistencia
- Alta deformación y restauración
- Resistente a la abrasión
- Soporta el paso del tiempo
- Flexible a bajas temperaturas
- Material de bajo costo

Es bueno conocer tanto las cosas positivas como negativas de los productos que se van a utilizar para la mejora de nuestra mezcla, asimismo se valoran estas y se toman en un análisis para determinar si es un producto que nos puede llegar a beneficiar.

2.5.2 Pétreos

Los agregados pétreos su principal función en la mezcla es la absorción del aglutinante y tener una adherencia adecuada para hacer que contenga una resistencia mayor, se implementan en proporción, basados al diseño previamente analizado. Pueden ser de origen volcánico o de tipo triturado. Son adquiridos de banco de material. Tienen propiedades como la absorción, la rugosidad, la porosidad, dureza, entre otros.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

Un pétreo es conocido como una roca o material granular o agregado definido como cualquier material duro e inerte con forma granulada o fragmentada, constituyendo el mayor porcentaje del peso y volumen de la estructura del pavimento flexible o rígido, influenciado por este mismo ya que proporciona su capacidad de resistencia. (*MS-22 Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica En Caliente*, 1992)

Son clasificados de acuerdo con su tamaño (grava, sello, arenas, limos y arcillas), por su origen: natural, artificial y reciclados, por último, por su naturaleza ígnea sedimentaria y metamórfica.

2.5.2.1 Agregado grueso

El agregado grueso o material pétreo grueso, dicho material se clasifica según el Sistema de Clasificación de Suelos (SUCS), se define como agregado grueso, a la parte del agregado pétreo total que queda retenido en el tamiz #4. Las características y propiedades deseables de los agregados gruesos para su utilización en las mezclas asfálticas, puede ser de origen volcánico, triturado, artificial o natural.



Figura 6 Agregado grueso grava triturada, fuente propia

2.5.2.2 Agregado fino

El agregado fino o material pétreo fino, se clasifica aquellos que vienen de la malla numero 4 hasta la malla número 200, son de origen natural o artificial, según

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

sea su caso de necesidad y zona de extracción, con cierto nivel de resistencia a la fragmentación.

Los agregados finos se definen como arena o piedra natural finamente triturada que es de tamaño pequeño, pasa por un tamiz de 9,5 mm (3/8"). Las arenas se producen por la descomposición de las rocas de forma natural, y las arrastradas por el viento o corrientes de ríos que se acumulan en zonas específicas. (Francisco Castillo, 1997)

2.5.3 PET

Se define como sustancias de naturalezas diferentes que presentan deficiencia de un punto de ebullición definido y en tanto se hace la variación de temperatura, obtienen distintas propiedades como elasticidad y flexibilidad por las cuales se pueden elaborar un modelo y adaptarlas para sus distintos usos. Obtenido de gas natural o el Petróleo modificado por un proceso químico y el resultado de estas es llamado resina. Los plásticos evolucionaron significativamente desde el procesamiento del hule, desarrollado por rodillos calentados con vapor al mezclar aditivos con el hule.

Algunas de las principales propiedades del PET son:

- Ligero, liviano
- Resistencia química y térmica elevada.
- Índice de deslizamiento bajo
- Bloqueador de CO₂, aceptable al O₂ y humedad.
- Maleable a materiales usados como bloqueador
- Puede estar reciclado, esto reduce su viscosidad.
- Índice de: translucidez, fortaleza ante la erosión y deterioro elevado
- Cristalino, con adquisición a cargas de colorantes
- Resistente y flexible

2.5.4 Ventajas y desventajas del PET

Hablando respecto a las ventajas y desventajas que puede tener cualquier material, siempre se debe de considerar si son asertivas o no para su utilización, ya

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

que estas son capaces de incrementar o disminuir la productividad en el esfuerzo a la fatiga en el caso de la adicción en la mezcla de asfalto en caliente.

2.5.4.1 Desventajas

Hoy en día se deben de considerar también las desventajas de los productos ya que ellas nos permiten identificar los puntos débiles del producto, a continuación, se mencionan algunas de estas desventajas que tiene el PET:

- Son un gran generador de basura.
- Contaminan los alimentos.
- Tienen un efecto ambiental negativo.
- Son notoriamente presentes en los cauces de corrientes superficiales y en el drenaje.
- Difíciles de clasificar y reciclar en algunos casos
- Producen gases tóxicos cuando se calcinan

2.5.4.2 Ventajas

Entre las ventajas que se tienen de las botellas de plástico (PET) tenemos como las principales las siguientes:

- Acceso fácil
- Facilidad de corte o seccionar
- Permite diferentes colorantes
- Resistencia al impacto
- Resistencia química para sustancias como disolventes
- Moldeable
- Ligero

Después de conocer sus ventajas y desventajas podemos decir que el producto es adecuado para ser considerado en nuestra adicción a la mezcla asfáltica en caliente.

2.5.5 Asfalto

La normativa SCT-N-CMT-4-05-001 define al asfalto como un material bituminoso de color negro, constituido principalmente por asfáltenos, resinas y

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

aceites, elementos que proporcionan características de consistencia, aglutinación y ductilidad a una mezcla asfáltica. Las características de un asfalto a distintas temperaturas, magnitud de carga y etapas de envejecimiento, determinan su desempeño como ligante en un sistema de pavimento. Actualmente es clasificado mediante Grados de Desempeño (PG), y generalmente constituye del 4 al 10% del total de la mezcla, los grados de desempeño son variables de acuerdo con su clasificación, dicha clasificación es basada en los extremos de temperatura del pavimento esperada durante su vida útil indicado mediante su notación PG X-Y. (MS-22 Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica En Caliente, 1992)



Figura 7 Mezcla asfáltica

Tabla 2 Propiedades y características del asfalto

Asfalto	Propiedades y caractreisticas
Color	Gris oscuro y negro
Densidad	0.92 a 1.02
Origen	destilación de petróleo crudo
Viscosidad	Alta
Afinidad al agua	Poca resistencia
Durabilidad	Alta
Temperatura	amplio rango de temperatura
Toxicidad	No es tóxico
Solubilidad	en sulfuro de carbono

Fuente:(Yandri Maldonado, 2021)

2.6 Mezclas asfálticas

Es una combinación de agregados minerales pétreos mediante un ligante asfáltico bajo proporciones exactas, a fin que los agregados queden cubiertos de manera uniforme por una capa de asfalto; las propiedades de cada material

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

determinan las propiedades tanto físicas, como mecánicas y el comportamiento funcional de la mezcla asfáltica, su empleo es en la construcción de vías de comunicación vehicular o comúnmente llamadas carreteras, ya sea como capa de rodadura o en capas inferiores, su función es proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica, facilitando la circulación de los vehículos además de transmitir suficientemente las cargas debidas al tráfico a las capas inferiores para su soporte y comodidad del usuario. (*MS-22 Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica En Caliente*, 1992)

Es la mezcla en caliente, uniforme y homogénea, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos previamente graduados, con tamaño nominal entre treinta y siete comas cinco (37,5) milímetros (1½ in) y malla 200, que satisfagan los requisitos de calidad establecidos en la Cláusula D. de la Norma N-CMT-4-04/17, Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas. Normalmente se utiliza en la construcción de carpetas asfálticas de pavimentos flexibles nuevos en los que se requiere una capacidad estructural, la cual esté en función del nivel de tránsito deseado, para esta investigación se considera un tránsito bajo.

2.6.1 Componentes de la mezcla asfáltica en caliente

Los requerimientos que debe cumplir una mezcla asfáltica en caliente de granulometría densa para su diseño y control de calidad. Así, como sus componentes a seguir para el diseño volumétrico de la mezcla asfáltica, son las siguientes:

- **Asfaltenos:** Materiales sólidos con apariencia de polvo similar al grafito. Pertenecen al grupo de compuestos heterocíclicos, son operativo y molecular, son considerados como la fracción más polar del petróleo, son partículas de color marrón o negro. (Pineda-Flores & María Mesta-Howard, n.d.)
- **Petróleo crudo:** Materia prima principal para la producción de asfalto, sin procesamiento industrial. Con un derivado del 3% para asfalto. (Javier Arbonés Villaverde, 2001)

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

- **Saturados:** También conocidos como máltenos, consistencia de líquidos pesados.
- **Compuestos polares:** Incluyen primeras acidifinas y segundas acidifinas.
- **Agregados pétreos:** Grava, arena y sello (en algunos casos) mezclados con el asfalto para generar una resistencia y durabilidad, por su ciclo de vida.

Para ello deben de pasar por un proceso previo para poder generarse el asfalto, un refinamiento de sus componentes y posterior a esto se genera la venta de este.

2.6.2 Características, funcionalidad y comportamiento de la mezcla asfáltica en su estado caliente

El comportamiento que se tiene en las mezclas asfálticas caliente se refiere a su manejo, capacidad física y mecánica en conjunto para efectuar su función de la resistencia de algunos factores.

Las mezclas asfálticas en caliente o frío, sirven para soportar de manera directa las cargas de los neumáticos y ser transmitidas estas cargas a las capas inferiores, proporcionando una rodadura con condiciones adecuadas, se puede utilizar en estructural o mecánica en las demás capas de los firmes. Como material estructural se puede caracterizar de varias formas.

Generalmente su comportamiento es dependiente de circunstancias externas a la mezcla, esto aplica en su momento de uso, al tiempo de aplicación o ejercer las cargas vehiculares y de la temperatura correspondiente a la zona. Por lo que es necesario conocer la reología del material.

Como en otros materiales de obra, se debe considerar la resistencia a la rotura, las deformaciones plásticas y la fatiga. Mediante una evaluación de sus propiedades por la cohesión y el rozamiento interno; módulo de rigidez, tanto transversal como longitudinal.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

2.6.3 Clasificación de la mezcla asfáltica por la proporción de vacíos

Este parámetro suele ser imprescindible para que no se produzcan deformaciones plásticas como consecuencia del paso de las cargas y de las variaciones térmicas o rodaduras en los costados del pavimento

- **Mezclas Cerradas o Densas:** La proporción de vacíos no llega a superar el 6 %.
- **Mezclas Semi-cerradas o Semi-densas:** La proporción de vacíos está entre el 6 - 10 %.
- **Mezclas Abiertas:** La proporción de vacíos supera el 12%.
- **Mezclas Porosas o Drenantes:** La proporción de vacíos es superior al 20 %.

2.6.4 Diseño de la mezcla convencional

Para el diseño de la mezcla asfáltica en caliente, se optó por utilizar una metodología de Marshall, la cual tiene como objetivo determinar el porcentaje de vacíos, densidad y flujo. El método Marshall se rige con 6 parámetros, de los cuales tres son los más fundamentales. También se rige por el parámetro de tráfico, el cual se basa en el número de ejes equivalentes en este estudio, se consideró para 10^6 . Este valor se considera para utilizar una estimación de esfuerzo y carga de la vía de carretera o pavimento asfáltico flexible, a la cual estará sometida en su vida útil. Lo que es crucial para garantizar su resistencia bajo temperaturas promedio con un PG 64-22 para este caso de estudio, y la carga a la que estará sometida.

Para la selección de la granulometría respecto a la mezcla asfáltica, se considera una de nivel densa. Se consideraron 6 tipos de contenido de asfalto (porcentajes), con relación al peso total de la mezcla (940 gr).

2.6.5 Composición química de la mezcla asfáltica

Es de utilidad el conocimiento amplio de la composición química de los asfaltos, así como de la mezcla en sí, es útil para el control y medidas de sus propiedades físicas.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

El asfalto es una mezcla de hidrocarburos parafínicos, aromáticos y compuestos heterocíclicos. Los hidrocarburos al procesarse en la refinación algunos de ellos de nivel liviano son eliminados, quedando los más pesados y de moléculas complejas. Los hidrocarburos pesados no pueden mantenerse en disolución, la función que efectúan al ser absorbidos por las partículas coloidales ya existentes, aumentado su volumen por la destilación.

Las mezclas asfálticas están constituidas por moléculas de elevado peso molecular los cuales son hidrocarbonados, heteroátomos y átomos metálicos (Alejandro Martínez, 2003) los cuales contienen:

Tabla 3 Composición química del asfalto

Elemento	Porcentaje
Carbono	82 - 88 %
Hidrogeno	8 - 11 %
Azufre	0 - 6 %
Oxigeno	0 - 1.5 %
Nitrogeno	0 - 1%

2.7 Hipótesis

Es posible que sea una alternativa aceptable, si se mejora la resistencia a la fatiga de una mezcla de concreto asfáltico ecológica con la adición de materiales reciclados, tales como son las fibras de PET y el polvo de caucho, entonces se podrá mejorar sus características tanto físicas como mecánicas.

2.8 Variables

2.8.1 Variable independiente

Mezcla asfáltica en caliente: se empleó una mezcla asfáltica en caliente con fino, arena, sello, grava y asfalto con grado PG 64-22 con temperatura superior a los 25 ° C, en condiciones de preparación en laboratorio.

2.8.2 Variable dependiente

Se cuenta con tres indicadores de variable independiente que se clasifican de la siguiente manera:

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

Mezcla asfáltica en caliente con fibras de PET: se elaboró una mezcla asfáltica en caliente convencional agregando variación de porcentajes de 1 – 4 % de fibras de PET.

Mezcla asfáltica en caliente con polvo de caucho: se elaboró una mezcla asfáltica en caliente convencional agregando variación de porcentajes de 1 – 4 % de polvo de caucho.

Mezcla asfáltica en caliente con fibras de PET y polvo de caucho: se elaboró una mezcla asfáltica en caliente convencional agregando variación de porcentajes del 2% de fibras de PET y del 1% de polvo de caucho.

2.9 Pirolisis

Descomposición térmica que ocurre en ausencia del oxígeno, a temperaturas altas 540° C, se obtiene un combustible similar al comercial. La pirolisis es una solución viable y sostenible hoy en día, gracias a las nuevas alternativas, sin embargo, sus costos aún siguen siendo excesivos para su producción, las emisiones generadas por los gases de efecto invernadero deben de ser gestionados para minimizar el impacto ambiental.

Es la descomposición térmica de la materia orgánica, en ausencia de oxígeno. Si el proceso que se usa es autotérmico se le introduce algo de oxígeno con el fin de producir una combustión parcial. Los compuestos de carbono se descomponen dando gases, hidrocarburos condensables y un residuo carbonoso, esta es una etapa fisicoquímico-previa a la combustión o a la gasificación. Se genera entre temperaturas de los 300°- 900° C. (Xavier Elías Castell y Enric Velo, 2012)

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

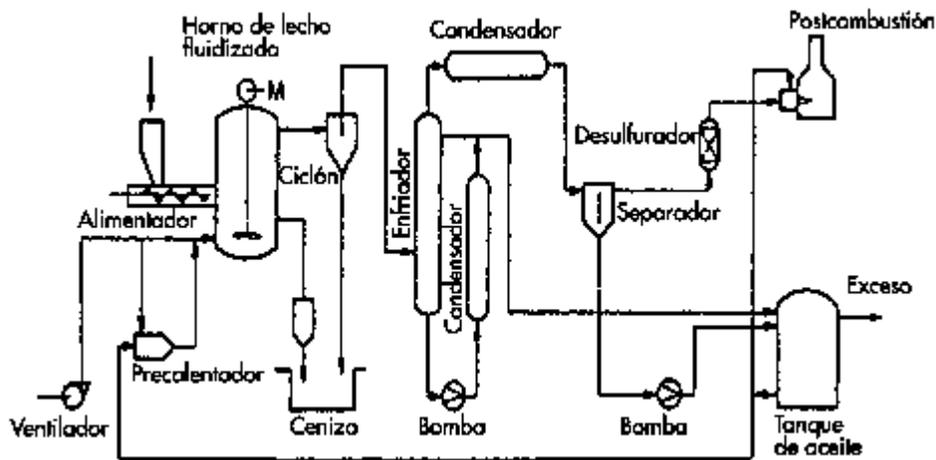


Figura 8 Esquema de una instalación de pirolisis (Xavier Elías, 2012)

Los procesos de pirolisis pueden generarse en tres bloques:

- Pirolisis convencional
- Pirolisis rápida
- Pirolisis instantánea

La tabla número 4 nos indica las principales características de los diversos tipos de pirolisis generados a baja temperatura.

Tabla 4 Comparación de los procesos de pirolisis

Proceso	Temperatura a °C	Velocidad de calentamiento °C/s	Tiempo residencia	Producto mayoritario
Convencional	500	2	Gases 5 s Sólido horas	Condensables
Rápida	400 a 800	>2	Gases <2 s	A temperaturas moderadas 500° C, Gases e hidrocarburos
Instantánea	>600	>200		ligeros

Fuente: (Xavier Elías, 2012)

La pirolisis también es una tecnología versátil ya que permite el tratamiento de residuos urbanos e industriales.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

2.9.1 Ventajas y desventajas

Como sus ventajas cabe destacar:

- Baja emisión de partículas
- Posibilidad de aplicación al tratamiento de suelos contaminados
- Reducción de residuos plásticos
- Generación de energía
- Empleo laboral a la comunidad
- Incineración en el proceso

Como sus desventajas se destacan:

- Costo inicial
- Eficiencia energética de acuerdo con el tipo de plástico usado
- Falta de maquinaria
- Conocimiento deficiente
- Parte del residuo se genera carbonosa

CAPITULO III METODOLOGÍA

3.1 Método de investigación

Para la investigación se clasifico en tres secciones, la primera que abarca toda la parte de investigación en libros, artículos, revistas, etc. la segunda sección que fue la recolección y acopio de materiales para su caracterización, en la última sección se tiene la carga de la realización de las probetas y las pruebas destructivas de las mismas.

Se presenta el flujo de la interacción que se realizó en el proceso de manera generalizada, en la siguiente figura:

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”



Figura 9 Flujo general del proceso de la metodología aplicada en la investigación, fuente propia

En los siguientes apartados se demostrarán cada uno de estos puntos en la investigación de manera más explícita y detallada para su entendimiento.

3.2 Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo experimental y analítico, compuesta de las variables independientes de la fibra de PET y el polvo de caucho, al buscar las nuevas alternativas en la solución de problemas planteando nuevos diseños de mezcla asfáltica en caliente y procedimientos de mezclado, aplicada por que tiene como base fundamental la solución de una problemática ambiental respecto a los residuos generados por los neumáticos y las botellas de PET.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

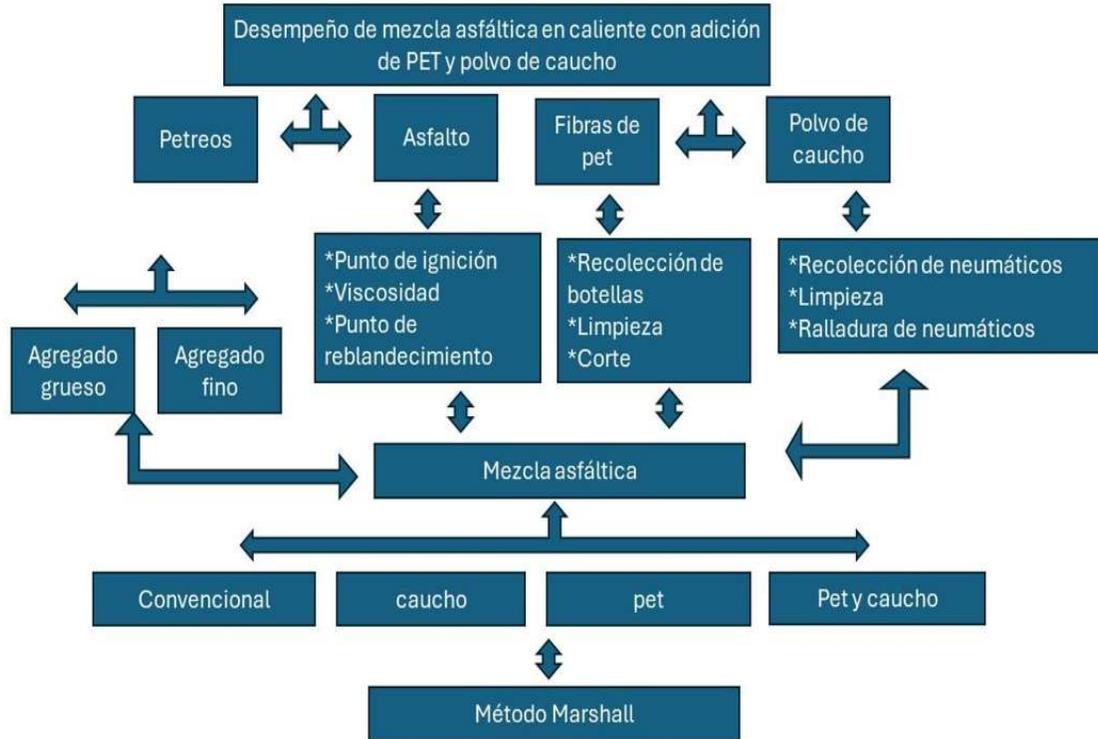


Figura 10 análisis de flujo de mezcla de procesos

Se planteo la clasificación del proceso de pruebas por secciones:

- Caracterización de pétreos y asfalto
- Obtención y procesamiento de materiales reciclados para la adicción
- Pruebas destructivas
- Análisis de los datos e información obtenida
- Recomendaciones de la investigación

Para la caracterización de los pétreos implica las pruebas de: Cuarteo, granulometría, partículas alargadas y lajeadas, desgaste de los ángulos, absorción, densidad, equivalente de arena, con respecto al asfalto se aplicó las pruebas de: penetración, punto de ignición de Cleveland, punto de reblandecimiento y ductilidad. En el siguiente capítulo serán descritas cada una de ellas.

En la obtención de los materiales para su adición y su procesamiento, se contempló la utilización de botellas de PET de material transparente, ya que por las

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

propiedades de la pintura se conlleva a la contaminación de la mezcla y se generan otras cualidades, por ello se optó por la incolora, para su uso se cortaron con ayuda de navajas las fibras de dos milímetros, al termino se les lijo, para darles rugosidad y poder seccionar a cada 2.5 cm.

Cabe mencionar que en las pruebas destructivas las probetas se clasificaron por secciones de porcentajes, donde se aplicó desde el 1-4% de cada material respecto al peso total de la probeta (940 gr), se clasifican los datos y se representaron en gráficas, tablas y fotografías.

Por último, está la sección de recomendaciones donde se mencionan los puntos relevantes para las mejoras y usos posteriores a esta investigación en investigaciones futuras.

3.3 Población y muestra

3.3.1 Población

Las probetas de ensayo cilíndricos utilizados en el análisis de la investigación y la interpretación de los resultados, sin la adición de plástico reciclado (PET), tienen un diámetro interno de 4" (101,6 mm) y una altura de aproximadamente 2.5 " (64 mm) con las adiciones de las fibras de PET en los porcentajes del 1%, 2%, 3% y 4% respecto a la cantidad del peso de la muestra (940 gr) una mezcla asfáltica diseñada por el método Marshall, con adición de polvo de caucho que se retiene en el tamiz 60 con porcentaje del 1%, 2% 3% y 4%.

Para la delimitación de la investigación para la población se tuvo en cuenta las siguientes características:

- **Adición respecto al diseño de mezcla asfáltica:** PET cortado en fibras de 2.5 cm x 2 mm.
- **Delimitación espacial:** diseños de mezcla realizados en laboratorio bajo normativa y régimen de seguridad del propio laboratorio.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

- **Adición respecto al diseño de mezcla asfáltica:** PET cortado en fibras de 2.5 cm x 2 mm y polvo de caucho que se retiene en el tamiz 60 hasta la malla número 200.

3.3.2 Muestra

Para la determinación de la muestra patrón de la mezcla asfáltica en caliente se realizó un total de 153 probetas, de las cuales se subclasifican en: convencional, con caucho, con adición de fibras de PET y con adición de fibras de PET y polvo de caucho, respectivamente en porcentajes de (1%, 1.5%, 2%, 3% y 4%), con una temperatura de diseño de 135 °C, Mostrado en la tabla número 5:

Porcentaje	Con PET	Con polvo de caucho	Con PET y caucho	Número de probetas
1%	9	9	9	27
1.5%	9			9
2%	9	9	9	27
3%	9	9		18
4%	9	9		18
convencional				54
Total				153

Tabla 5 Clasificación de probetas

Podemos considerar que las probetas que no llegaron a ser utilizadas en la prueba del método Marshall no son consideradas en la tabla anterior, ya que no se tienen valores de ellas y no se pueden tomar en consideración, por su destrucción antes de ser sometidas al método Marshall.

3.4 Recolección de datos y materiales

3.4.1 Polvo de caucho (Neumático)

El polvo de caucho se obtuvo de la recolección de llantas que se encuentran discontinuadas y sin uso, luego se procedió a él molido de la misma en partículas más pequeñas para su posterior uso, pasándolo por las diferentes mallas (del tamiz 100 al 60), para que quedara clasificado. Dicho material fue donado por el laboratorio de asfaltos para esta investigación.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”



Figura 11 Caucho molido tipo polvo retenido en la malla 60, fuente propia

3.4.2 Fibras de PET

Las fibras de PET se generaron de la recolección de botellas de plástico (polietileno de tereftalato), con la característica principal de ser transparente, de un litro, de la marca comercial de leche Lala, no rotas, ni contaminadas de agentes como aceites, gasolina u otros productos, se consideran este tipo de botellas ya que no contiene colorantes que afecten a la mezcla, se lavaron en el laboratorio con agua y jabón para dejarse secar boca abajo durante 24 horas en sombra, posterior a ello se cortaron en tiras de 2 mm, al termino se lijaron con lijas para madera del número 100, para que estas tengan una rugosidad y no permitan que tenga movimiento interno en la probeta, asimismo evitar la fricción entre las partículas con ello se contrarresta las caras lisas de fabricación, se cortaron las fibras a 2.5 cm. Para el desarrollo del proyecto de la investigación, el material fue reciclado en el transcurso aproximado de 3 mes, con un peso aproximado de 4.5 kg, del cual se obtuvieron 72 gr de fibras por cada botella.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”



Figura 12 Recolección de PET y corte en tiras, fuente propia

3.5 Procesamiento de la información y pruebas

El asfalto es una sustancia negra viscosa que según la temperatura ambiente varía a sólido y semisólido. El asfalto es buen impermeabilizante y esta se obtiene de la derivación del petróleo o combinaciones. Las sustancias químicas como los hidrocarburos, que son mezclas moleculares de hidrógeno y carbono, así como algunas tazas de azufre, oxígeno, nitrógeno y otros elementos, son los componentes básicos del asfalto.

El asfalto con la mezcla de los pétreos genera un pavimento flexible, este evita la filtración del agua, es accesible para su producción en cantidad. Algunas de las propiedades principales de las mezclas asfálticas son:

- Trabajabilidad
- Resistencia a las condiciones climáticas
- Durabilidad
- Resistencia al envejecimiento
- Impermeabilidad
- Resistencia al deslizamiento
- Resistencia a fatiga
- Resistencia bajo carga
- Resistencia a las deformaciones

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

3.6 Caracterización de asfalto

3.6.1 Penetración

(MMP-7-05-006-00)

Su objetivo principal es conocer el grado de dureza original del asfalto, es colocada una capsula con asfalto calentado previamente sin exceder los 130°C y se deja reposar el material hasta su enfriamiento, el material se deja en baño maría por 30 minutos a 25°C , posterior a ello en el penetrometro para ser penetrada la muestra por tres secciones debe de tener una separación de la aguja de un centímetro desde los bordes de la capsula para evitar complicaciones, se introduce el penetrometro en el baño maría o en un recipiente para mantener la temperatura constante durante la elaboración de la prueba.

Se debe de realiza tres veces esta prueba para tener un rango de comparación y se efectúan los cálculos al término de las lecturas.



Figura 13 Prueba de penetración, fuente propia

3.6.2 Punto de ignición de Cleveland

(M-MMP-4-05-007-00)

Esta prueba se realiza con ayuda de la copa de Cleveland, donde se calienta el material asfáltico con ayuda de un mechero de Bunsen para mantener una temperatura de manera constante donde se incrementa de $2-5^{\circ}\text{C}$ por minuto, posterior a la temperatura deseada que en este caso es llegar a los 130°C empezara a irse acercando una flama con ayuda de un encendedor o cerillo, para

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

verificar si este tiende a tener un punto de inflamación, en el momento que este reaccione a la flama nos va a generar unas chispas, justo en ese instante de generar las chispas se deberá de tomar la lectura y ese es el valor buscado para compararlo con el de Norma y el valor que nos proporciona el proveedor.



Figura 14 Punto de ignición, fuente propia

3.6.3 Punto de reblandecimiento

(M-MMP-4-05-009-00)

La prueba nos permite llegar a estimar la consistencia del asfalto, tener el conocimiento de su temperatura que nos marca la deformación, el asfalto es colocado en los anillos para su secado, se reposa por un lapso de 30 minutos, mientras tanto se va preparando el vaso de precipitado, con temperatura de -5°C para contener agua y la base de los anillos es de igual manera colocado a temperatura baja, se utiliza el mechero para ir generando el calor de manera directa y constante a la muestra, se colocan los anillos dentro de la base para ser sumergidos en el vaso, se pone en el mechero y se da inicio a la prueba al ir midiendo la temperatura con un minuto de diferencia y no subiendo a más de 5°C entre este, al llegar al calor de temperatura donde se desprenden los balines de la superficie del asfalto y tienden a caer al fondo del vaso, se deberá de tomar el nivel de temperatura para este ser comparado con lo que respecta a la norma.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”



Figura 15 Punto de reblandecimiento, fuente propia

3.6.4 Ductilidad

Se considera aplicar esta prueba por al menos tres veces para tener un valor de comparación, se calienta el asfalto a 140°C y se vierte en las braguetas, previamente se les coloca talco para el enrase, se dejará enfriar por un lapso de dos horas, es sometido en la maquina con una velocidad constante hasta que se truene, o el hilo asfáltico sea tan delgado que llegue a tocar la superficie y se registra el valor obtenido para efectuar los cálculos correspondientes.



Figura 16 Braguetas para enrase y prueba, fuente propia

La lectura se toma desde el momento que se truena el hilo asfáltico y es a una temperatura constante que se deberá de someter la muestra de 25°C , ya que se percibe que esta prueba termino, se procede a la limpieza de los utensilios y se procede a la siguiente ejecución de la prueba.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

3.7 Caracterización de los pétreos

3.7.1 Cuarteo

(NMX-C-554-ONNCCE-2018)

En el banco de material pétreo se efectúa el muestreo para tener un material previamente apegado a lo real tomando la muestra representativa en la zona, sin dejar de tener en cuenta que se debe de llevar un proceso de acopio de muestra. Se toma en parte circular del apilamiento del material con paladas.

Se coloca en un costal con la ayuda de una pala y se marca con plumón el costal para tener el registro previo de dónde se trae el material, aunado a ello es colocada la fecha de obtención. Tomamos la muestra de 50 kilos aproximadamente para realizar la prueba y se efectúa dicho procedimiento tres veces obteniendo la Masa seca suelta (MSS) y de igual manera se realiza para la masa seca varillada (MSV) teniendo la diferencia del varillado en forma circular en la cual se hace en tres capas el llenado de la tara con 25 golpes por capa y enrasado al final en ambos casos para registrar su peso, sin generar golpes ni acomodar el material, ya que esto puede alterar los resultados de la misma, este debe de ser de manera aleatoria y en forma cruzada.



Figura 17 cuarteo, fuente propia

Teniendo así una muestra más homogénea, correcta y uniforme, dando como resultado las partículas de todas las medidas necesarias para el diseño de mezcla, dicha forma de hacer el cuarteo se basa en la Norma NMX-C-170-1997-ONNCCE

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

desde el banco de material, en el sitio de laboratorio se implementa de la misma manera para la reducción de la muestra.

3.7.2 Granulometría

NMX-C-568-ONNCCE-2020

Se utilizan las mallas 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", 1/4", número 4, 10, 20, 40, 60, 100 y 200, se procede hacer el cuarteo, se toma una muestra representativa de 10 kilos aproximadamente para gravas y sello, respecto a la arena se consideran hasta 1 kg y se van pasando desde la malla de mayor abertura a la más pequeña, siendo este material agitado hasta que se verifique que ya no caen más partículas, separando el material retenido en cada malla para ser pesadas y asimismo efectuar su registro de los pesos en la tabla, se realiza los cálculos y se grafican.



Figura 18 Granulometría, fuente propia

Se muestra en las figuras número 20 parte del proceso requerido para la granulometría donde se va cribando por secciones desde la malla con mayor abertura hasta la de menor.

3.7.3 Partículas alargadas y lajeadas

Consiste en la obtención de una muestra representativa de 200 piezas aproximadamente para ser pasadas por los calibradores, donde se pasa cada una de las partículas como se muestra en las figuras 21, se consideran en las alargadas pasar por el lado más ancho y largo que tiene cada una de las partículas, se van a clasificar por tamaño con ayuda de las mallas para que estas sean más fáciles de

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

identificar, así como de clasificar y pasar una a una por el orificio que le corresponde a la abertura.



Figura 19 Partículas alargadas y lajeadas, fuente propia

Se presenta parte del procedimiento efectuado en la practica de partículas largadas y lajeadas, donde es necesario pasar cada una de las partículas por los orificios de los calibradores, descartando los que pasan y los que no pasan, posterior a ellos se realizo una tabla con los datos para sacar los porcentajes y asi concluir con que el material sea o no aceptable, ya que esto es importante porque al realizar la mezcla pueden tener muy poca rugosidad por lo lisas y largas que tienden a ser.

3.7.4 Desgaste de los ángeles

NMX-C-196-ONNCCE-2010

La prueba consiste en la toma de una muestra representativa de 5 kilos para las características del tipo de clasificación B. Se colocan dichas partículas en la máquina de desgaste, cuenta con un cilindro en el cual serán colocadas las 11 esferas y se procede a iniciar el proceso mecánico de la maquina durante 12.5 minutos, posterior a ello se pesa el deberá de pesar el material para efectuar las operaciones y sacar el índice de desgaste, se medirá la variación granulométrica del agregado pétreo como la diferencia que pasa por la malla número 12, dicho proceso se debe de efectuar posterior al cribado antes y después de ejecutar la prueba. Tenemos como resultado la resistencia con la que cuentan los agregados gruesos al ser sometidos a un proceso de desgaste, su composición para la resistencia al golpe y su fractura.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”



Figura 20 Desgaste de los ángeles, fuente propia

Respecto a las imágenes de la figura 22, se muestran las 11 esferas y la colocación del material en la máquina, así como el vaciado del mismo al término de la prueba para poder ser pasado por la malla. Dicho material es pasado por la malla número 12 y el material que se retiene en la malla se pesa para tener el total de material que se desgasta, se realiza la anotación del peso para pasarlo a la fórmula y así tener el porcentaje de dicha prueba, al último se compara el resultado con el de la Norma para cotejar que estamos dentro de los parámetros aceptables y así poder proceder con las siguientes pruebas.

3.7.5 Densidad en gravas

NMX-C-571-ONNCCE-2021

Se deja en una charola un promedio de 1.5 kilos a saturar en agua durante 24 horas \pm 1 previo a la prueba, se coloca un tanto de la muestra de aproximadamente 200 gr, se seca de manera superficial con ayuda de una franela previamente humedada, se pesa registrando el valor como peso inicial y se ingresa de manera lenta sin aventar al picnómetro con sifón, evitando que se propaguen las partículas de agua por fuera de este, sino que el agua sea expulsada por la punta del sifón y se recauda en la probeta graduada, hacemos la lectura y registramos el dato como peso final.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”



Figura 21 Densidad en gravas, fuente propia

Se toma las lecturas de los milímetros de agua que son extraídos como se indica en las imágenes de la figura 23 y se ingresan a la tabla de datos. Se repite el procedimiento en tres ocasiones para hacer una comparación y tener el promedio de estas, teniendo al final una comparativa con la Norma y poder proceder con las siguientes pruebas a realizar.

3.7.6 Absorción

Se coloca en una charola metálica previamente 24 horas + - una hora antes a saturar una muestra de 1.5 kilos. Se toma un aproximado de 200 – 250 gr para secarse de manera superficial con una franela húmeda se pesa el material y se registra el valor como peso inicial, posterior se lleva a realizarse el secado de la muestra en la estufa, verificando con el apoyo de un cristal, se lleva nuevamente a pesar registrando el valor.

La absorción que generan los agregados pétreos es una de las propiedades que más influencia en la mezcla, si presentan humedad se debe de modificar el diseño ya que esta será afectada en su procesamiento, causando una baja en la resistencia.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”



Figura 22 Absorción en grava y sello, fuente propia

Como se muestra en las imágenes de la figura 24 se procede a pesar la muestra seca, sin exceder el secado superficial de la muestra con la franela, se llena la tabla de datos, dicho procedimiento es recomendable que se realice por tres ocasiones y se efectúan los cálculos correspondientes, por último se comparan con los valores requeridos en la Norma para poder verificar que este dentro de los parámetros requeridos, procediendo a la siguiente prueba.

3.7.7 Equivalente de arena

Se utiliza una cantidad de material ya muestreado de aproximadamente 200 gr que son colocados en las probetas para ser llenados de agua hasta el nivel marcado en los vasos, se debe de colocar la solución dentro del gotero para su llenado, se agitan después de los lapsos de tiempo establecidos (sin exceder de 10 minutos entre los lapsos), para que el material se condense de manera óptima, se deja que tenga un reposo y se mide la distancia con la regleta, se toma cada una de las medidas en las tres pruebas, finalmente se registran los valores para ser comparados con los de la Norma vigente.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”



Figura 23 Equivalente de arena, fuente propia

Se muestra en la figura 25 el material usado en la prueba, donde se realiza a la vez dicho proceso por lo menos tres ocasiones para tener un rango de comparación, al último se comparan los valores resultantes con los de la Norma para corroborar si está dentro de lo permisible.

3.8 Diseño Método Marshall

El concepto del método Marshall fue formulado por Bruce Marshall, Ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas del Estado de Misisipi. En el diseño de la mezcla cuando se van a someter las probetas a la prueba del Método Marshall se debe considerar cada uno de los requisitos de calidad para mezcla asfáltica para nivel de tránsito bajo, ya que es el que se requiere en esta investigación, existen cuatro rangos de tránsito: bajo, intermedio, alto y muy alto.

En la tabla de la figura 26, se muestra que debemos dar 50 golpes por cada una de las caras ya que se está considerando para un nivel de tránsito menor a un millón de ejes equivalentes, golpes que se deben de dar por cada cara de nuestra probeta:

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

Características	Especificación
Propiedades volumétricas	
Compactación; número de golpes en cada cara de la probeta (Marshall)	50
Vacios de aire (Va); %	4
Vacios llenos de asfalto (VFA); %	65 – 78
Relación Filler-asfalto (R_{F-Pbe}) ^[1]	0,6 - 1,2
Propiedades de Desempeño	
Estabilidad; N (lbf), mínimo	5340 (1 200)
Flujo; mm (10^{-2} in) ^[2]	2 – 4 (8 - 16)

Nota 1. Se considera Filler el material que pasa la Malla No. 200

Nota 2. Para asfaltos modificados el valor de flujo solo se reportará

Figura 24 Requisitos de calidad para mezclas asfálticas para nivel de tránsito bajo, Martillo Marshall. (Dr. Horacio Delgado Alamilla, 2020)

El método Marshall, está diseñado solo para ser aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1”) o menor.

Los valores anteriores se deben de considerar para que sea una mezcla confiable, porque se toman los rangos de su desempeño, al término de cada prueba se compara con los resultados de la Norma que los rige.

Para el material de asfalto utilizado para la mezcla en caliente, con adición de fibras de PET y polvo de caucho, así como la convencional, se utilizó asfalto de la asfaltera MEGASFALTO de Salamanca, ellos nos suministraron el material asfáltico suficiente para dichas muestras en modo de donación para la investigación.

Surge como iniciativa del cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos en 1943. El propósito del Método Marshall es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados pétreos.

3.9 Enfoque de ciclo de vida

A raíz de nuevos descubrimientos, se ha estimulado la investigación del enfoque de ciclo de vida para los residuos sólidos, puesto que cada día son más

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

accesibles estos para la sociedad, se considera que toda materia tiene un ciclo de vida y por ello es necesario investigar sobre de ella.

Los procesos para la obtención del PET y el caucho tienen un impacto medioambiental, específicamente en el área de la producción masiva. Respecto al transporte o vías de comunicación, los factores que se deben considerar más importantes son:

- **Costos de transporte:** se consideran los costos de gasolina o Diesel, así como las emisiones de CO₂, Costos de procesamiento para su corte, donde se consideran los gastos de los utensilios a requerir para su corte o ralladura, dependiendo el caso.
- **Impacto al uso de suelo:** Al utilizar residuos sólidos implica menor tiradero de estos en contenedores, vertederos, mantos acuíferos, entre otros. Los suelos son menos agresivos por la contaminación y calcinación de estos. Menor desgaste de banco de material, por la implementación de estos recursos.
- **Expectativa de vida útil:** la durabilidad de la mezcla asfáltica con la adición de las fibras de PET y el polvo de caucho alargan la vida útil, presentando una ventaja en la sostenibilidad.

Merece la pena tener una alternativa de reutilización de materiales de residuos sólidos, que estos a su vez tendrán una reducción de los gases con efecto invernadero, ya que se reduce su manejo inadecuado y por ende no estarán expuestos a quemas clandestinas.

El análisis del ciclo de vida (ACV) se emplea con el objetivo principal de considerar y comparar cada una de las alternativas viendo si estas mitigan el impacto medioambiental de una serie de materiales o productos. Un análisis de ciclo de vida debe estar conformado por todas las etapas de un producto y considerando los usos alternativos que este tenga.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

Algunas de las etapas que se consideran dentro del ciclo de vida para un producto o material deberán de ser:

- Extracción de materia prima
- Fabricación o producción
- Distribución
- Uso de producto o material
- Reparación
- Mantenimiento
- Desechos
- Servicios
- Reutilización, reciclaje o recomposición
- Fin de su vida útil

Considerando en todo caso las normas establecidas, para cada uno de los productos que se deban de investigar, para el caso de esta investigación se consideró lo siguiente con respecto al sitio de residuos sólidos y residuos sólidos urbanos:

- NOM-083-SEMARNAT-2003, Que nos incluye especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, manejo y monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio para Residuos Sólidos Urbanos (RSU)
- NOM-098-SEMARNAT-2002. Que incluye protección ambiental – incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

CAPITULO IV RESULTADOS

Para ir evaluando cada una de las pruebas realizadas, se tomarán en cuenta los estándares normados en la secretaria de Comunicaciones y Transporte (SCT), para ello se deben de tomar los parámetros que indiquen cada una de ellas y así comprobar si el proceso es aceptable para pasar a la siguiente fase.

Se clasificaron por secciones los resultados, primeramente, la sección de caracterización de los materiales, posterior las pruebas destructivas y por ultimo los resultados de la aplicación del método Marshall con gráficas y tablas.

Característica [1]		Valor
GRAVA		
Densidad relativa del material pétreo seco, mínimo		2,4
Desgaste de Los Angeles, %, máximo		35
Desgaste Microdeval, %, máximo		18
Intemperismo acelerado, %, (5 ciclos), máximo [2]	En sulfato de sodio	15
	En sulfato de magnesio	20
Partículas alargadas y lajeadas; %, máximo		40
Partículas trituradas, %, mínimo	Una cara	90
	Dos o más caras	80
Desprendimiento por fricción, %, máximo		20
ARENA Y FINOS		
Densidad relativa del material pétreo seco (d_{ps}), mínimo		2,4
Angularidad, %, mínimo		40
Equivalente de arena; %, mínimo		45
Azul de metileno, mg/g, máximo		18

[1] El material será 100% producto de trituración de roca sana.

[2] Será suficiente que el intemperismo acelerado cumpla con una de las dos condiciones: en sulfato de sodio o en sulfato de magnesio.

Figura 25 Requisitos de calidad del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa, Fuente: (SCT, 2017)

A continuación, se desglosan los resultados obtenidos para cada una de estas pruebas, en los próximos apartados de este documento.

4.1 Resultados de caracterización del asfalto

En esta sección se presentarán cada uno de los resultados que conllevan las pruebas de caracterización para el asfalto con un grado PG 64- 22.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

4.1.1 Penetración

De cada una de las lecturas tomadas en las cápsulas con asfalto después de ser colocadas en el baño maría para su uso, tenemos como resultado la siguiente tabla número 6:

Cápsula	Lectura	mm	promedio
1	1	63	61.33
	2	62	
	3	59	
2	1	59	60.67
	2	62	
	3	61	
3	1	58	61
	2	63	
	3	62	
Promedio			61

Tabla 6 Penetración

Por lo que se tiene un promedio de la penetración de 61 mm, la norma nos marca un mínimo de 60 mm así que estamos cumpliendo con ello.

Cabe destacar que en esta investigación se efectuó dos veces esta prueba ya que las temperaturas en las que se había realizado la primera vez nos encontrábamos a 35° C, a las 9:32 am del día 25 de abril del 2024 fue una afectación a nuestra prueba, por lo que se corroboró realizar por segunda ocasión el día 24 de enero a las 9:25 am y se tienen los resultados antes mencionados en la tabla número 6.

4.1.2 Punto de ignición de Cleveland

Respecto a la chispa que debe de ejercer la prueba al llegar al punto de ignición se corrobora que está en 243° C, la norma nos marca que debe de estar en 230°C mínimo para los asfaltos de GP 64 -22, quiere decir que se trabajó con un excelente producto.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

4.1.3 Punto de reblandecimiento

Respecto a la prueba de reblandecimiento realizada al asfalto de grado PG 64 – 22, se efectuó tres veces para tener un rango de comparación, por lo que se puede verificar en la siguiente tabla los resultados de dicha prueba:

Esferas	Temperatura °C	Tiempo minutos
1	41	10.27
2	42	10.32
1	41	10.38
2	41	10.43

Tabla 7 Prueba punto de reblandecimiento en asfalto

Por lo que en promedio está a 41° C la ruptura del reblandecimiento y la caída de las esferas con la temperatura constante.

4.1.4 Ductilidad

Muestra	Longitud (cm)
1	112
2	98
3	107

Tabla 8 Prueba de viscosidad para asfalto con grado PG 64-22

Podemos deducir la capacidad del asfalto para deformarse sin llegar a la ruptura de este, asimismo la energía que se requiere de cohesión.

4.1.5 Contenido mínimo de asfalto

Como sabemos que debemos tener un punto inicial para nuestra mezcla con el agregado de asfalto en un porcentaje, se debe de realizar la aplicación de los dos métodos:

- **Método analítico:** donde se consideran los bloques de mallas para poder hacer la sumatoria y tener una superficie de los pétreos que se deberá cubrir con el asfalto, se consideran parámetros, de acuerdo con el tipo de agregado que es, ya sea redondeado, de río, volcánico o triturado, también el nivel de absorción del material es considerado.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

- **Método por fórmula:** donde se consideran los parámetros, así como los pesos de las mallas en porcentajes.

Se presenta las tablas número 9 y 10 los valores:

Tamaño de material	%en peso	constante de área (m ² /Kg)	superficie parcial (m ² /Kg)	Índice asfáltico	contenido mínimo de asfalto
1 1/2" - 3/4"	3.02	0.27	0.815	0.006	0.005
3/4" - No. 4	42.94	0.41	17.605	0.006	0.106
No. 4 - 40	42.19	2.05	86.490	0.008	0.692
No. 40 - 200	9.69	15.38	149.032	0.008	1.192
pasa No. 200	2.16	53.3	115.128	0.008	0.921
suma	100				2.916

contenido mínimo de asfalto	2.92
-----------------------------	-------------

Tabla 9 Contenido mínimo de asfalto por el meto cuantitativo

En el método analítico se debe de tener en cuenta que una buena granulometría, ya que esta es parte fundamental.

$$A= 0.02a + 0.045 b + cd$$

a=	60.82
b=	37.03
c=	2.16
d=	0.3
Asfalto=	3.53

Tabla 10 valores del método por fórmula para el contenido mínimo de asfalto

Utilizamos también el método analítico, y este fue el utilizado para determinar posteriormente cuantos litros por metro cúbico se necesitan de emulsión para el material pétreo.

$$A = 0.02a + 0.045b + cd$$

Dondé

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

A = contenido mínimo de asfalto expresado como residuo y referido al peso del agregado (%).

a = % de material retenido en la malla No. 10.

b = % de material que pasa la malla No. 10 y se retiene en la malla No. 200.

c = % de material que pasa la malla No. 200.

d = Coeficiente asfáltico que varía con las características del material, de acuerdo con los datos de la tabla siguiente:

Tenemos ambos resultados de los métodos, ya que en el analítico tenemos que el contenido mínimo debe de ser de 2.92% y en el método de fórmula se considera el 3.53 %, por lo que se consideró el valor inicial del mínimo de asfalto para el diseño con el 4%, se tomaron en cuenta a cada 0.5% para cubrir con al menos seis valores, dicho valor de inicio se considera por la experiencia y en base a Norma, dicha experiencia tomada en el transcurso del tiempo en el laboratorio de asfaltos “Ing. Luis Silva”.

Posterior a ellos se consideró también que los mejores resultados de la prueba oscilaban entre el 5.5% de asfalto y el 6% por lo que se procedió a efectuarse las corridas con una diferencia de cada 0.25%, teniendo como valor inicial el 5.5%, 5.75% y terminando en el 6%.

4.2 Resultado de caracterización de pétreos

Se realizó la visita al banco de materiales ubicado en la carretera Morelia - Salamanca km. 14.5, Mesón Nuevo, Michoacán, de donde se trajo seis costales de grava triturada y cuatro costales de sello para las pruebas y los ensayos correspondientes, posterior a su obtención se realizó la caracterización de los materiales pétreos (sello y grava triturada), posterior a ello al comienzo del semestre de agosto – octubre 2022, la arena se consiguió en el Banco de materiales Joyitas, ubicado sobre la carretera Morelia – Quiroga en el Km y del banco de materiales ubicado en la carretera Morelia – Salamanca km 14.5, Mesón Nuevo, Michoacán, se realiza posterior a la obtención la caracterización de la arena, asimismo en condiciones de laboratorio.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

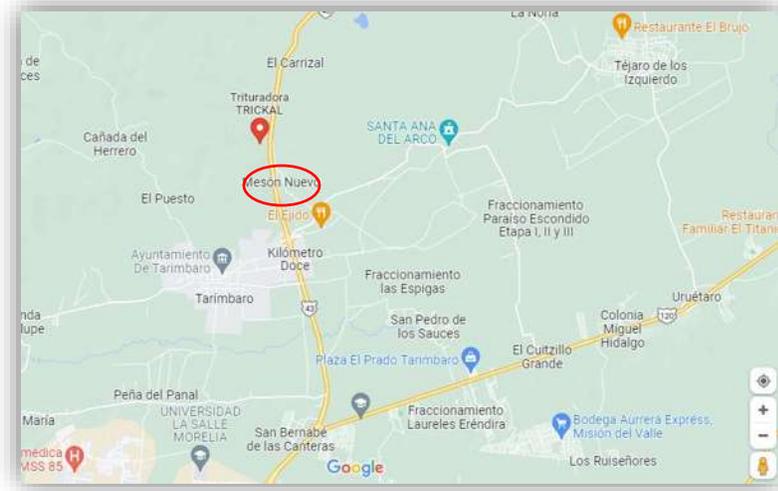


Figura 26 Ubicación de banco de materiales Tres María, Fuente Google Maps



Figura 27 Banco de materiales la Joyita y obtención del muestreo de pétreos, fuente propia

En el banco de material se procedió a realizar el muestreo, la colocación del material en costales de 50 kilos, marcados con el tipo de pétreo y su clasificación para poder ser llevados a laboratorio para su caracterización.

4.2.1 Cuarteo, peso volumétrico seco suelto (WVSS) y peso volumétrico seco varillado (WVSV)

se realiza el cuarteo solo el procedimiento teniendo en cuenta que las partículas son equitativas, dicho y percibido a simple vista. Tenemos como resultado de dichas pruebas de caracterización los siguientes valores, considerando para cada uno de ellos tres tantos, como se muestra en las siguientes tablas:

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

no.	Masa del recipiente	Volumen del recipiente	Masa del recipiente con el material	Masa de la grava	MVSS (gr/cm ³)
1	3630	8120	18577	14947	1.84
2	3630	8120	18178	14548	1.79
3	3630	8120	18551	14921	1.83
Promedio					1.82

Tabla 11 Peso volumétrico seco suelto

Tenemos un valor de 1.82 gr/ cm³ para el peso volumétrico seco suelto.

4.2.2 Granulometría

Como bien se sabe después de hacer el cribado del material pétreo por cada una de las mallas, se debe de registrar los valores de cada uno de los pesos por columna, para el cálculo del porcentaje retenido y el porcentaje acumulado, se tiene la clasificación de los tres materiales a continuación en las tablas 12, 13 y 14:

Malla	Peso retenido	% Retenido	% Acumulado	%Que pasa	%Que pasa (NORMA)	
4	5	0.83	0.83	99.17	50	64
10	179	29.54	30.37	69.63	36	46
20	190	31.35	61.72	38.28	25	35
40	114	18.81	80.53	19.47	18	27
60	41	6.77	87.30	12.70	13	21
100	28	4.62	91.92	8.08	9.0	16
200	26	4.29	96.21	3.79	5.0	8
CHAROLA	23	3.79	100.00	0.00		

Tabla 12 Granulometría arena para diseño de mezcla asfáltica en caliente

Malla	Peso retenido	%Retenido	% Acumulado	%Que pasa	%Que pasa (NORMA)	
1 "	0	0	0	100	100	100
3/4"	0	0.00	0.00	100.00	90	100
1/2 "	921	12.56	12.56	87.44	76	89
3/8"	4559	62.19	74.75	25.25	67	82
1/4"	1490	20.32	95.07	4.93	56	71
No. 4	310	4.23	99.30	0.70	50	64
CHAROLA	52	0.70	100.00	0.00		

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

Tabla 13 Granulometría sello para diseño

Malla	Peso retenido	% Retenido	% Acumulado	% Que pasa	% Que pasa (NORMA)	
1 "	0	0.00	0.00	100.00	100	100
3/4"	1293	8.62	8.62	91.38	90	100
1/2 "	4851	32.35	40.97	59.03	76	89
3/8"	5104	34.04	75.01	24.99	67	82
1/4"	3056	20.38	95.39	4.61	56	71
No. 4	471	3.15	98.54	1.46	50	64
CHAROLA	219	1.46	100.00	0.00		

Tabla 14 Granulometría gravas para diseño

De las tres muestras tomadas por cada uno de los agregados se procedió a hacer un balance y se promediaron dichas tablas, conforme a lo que nos indica el manual, se considera comparar con las especificaciones y material que se requiere por cada una de las mallas para que la granulometría este dentro del rango de 19 mm (3/4") para el diseño de mezcla asfáltica en caliente con granulometría densa, que se tomara para las probetas convencionales, posterior a ello se considera el mismo para la adición de los materiales de reciclaje.

Malla		Tamaño nominal del material pétreo ^[1]				
		mm (in)				
Abertura mm	Designación	9,5 (%)	12,5 (%)	19 (%)	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	½ in	70 - 89	58 - 81	44 - 71	36 - 65	30 - 59
4.75	N°4	56 - 82	45 - 74	37 - 64	30 - 58	25 - 53
2	N°10	28 - 64	25 - 55	20 - 46	17 - 42	13 - 38
0.85	N°20	18 - 49	15 - 42	12 - 35	9 - 31	6 - 28
0.425	N°40	13 - 37	11 - 32	8 - 27	5 - 24	3 - 21
0.25	N°60	10 - 29	8 - 25	6 - 21	4 - 19	2 - 16
0.15	N°100	6 - 21	5 - 18	4 - 16	2 - 14	1 - 12
0.075	N°200	2 - 10	2 - 9	2 - 8	1 - 7	0 - 6

[1] El tamaño nominal de un material pétreo es la abertura de la malla con la que se designa el material que cumpla con una determinada granulometría.

Figura 28 Requisitos de Granulometría del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa, fuente Norma N-CMT-4-04-08

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

Valores que cumplen con la norma N-CMT-4-04-08

Para la integración de la muestra, se tiene que efectuar el llenado de la siguiente tabla donde se busca la mejor combinación para cubrir los límites de la norma, estos deben estar dentro del límite superior e inferior para un buen desempeño, así mismo se presenta en la siguiente tabla los resultados de dicho diseño donde se utilizó el 35% de grava, el 11% de sello, el 47% de arena volcánica y el 7 % de fino.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

	mallas	1"	3/4"	1/2"	3/8"	1/4"	No. 4	10	20	40	60	100	200
Grava	100	91.38	59.02	24.98	4.60	1.46	0	0	0	0	0	0	0
Sello	100	100	87	25.25	4.93	0.70	0	0	0	0	0	0	0
Arena	100	100	100	100	100	100	99.17	69.64	38.28	19.47	12.71	8.09	3.80
fino	100	100	100	100	100	100	98.17	93.58	80.12	41.28	21.41	11.01	6.10
Grava (%)	35	35	31.98	20.66	8.74	1.61	0.51	0	0	0	0	0	0
sello (%)	11	11	11	9.62	2.78	0.54	0.08	0	0	0	0	0	0
Arena (%)	47	47	47	47	47	47	46.61	32.35	17.46	8.73	5.53	3.35	1.57
 fino (%)	7	7	7	7	7	7	6.87	6.55	5.61	2.89	1.50	0.77	0.43
suma	100	100	96.98	84.28	65.52	56.15	54.07	38.90	23.07	11.62	7.03	4.12	2.00
norma	lim sup	100	100	89	82	71	64	46	35	27	21	16	8
	lim inf	100	90	72	60	44	37	20	12	8	6	4	2

Tabla 15 Integración de la muestra para el diseño de mezcla asfáltica en caliente

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

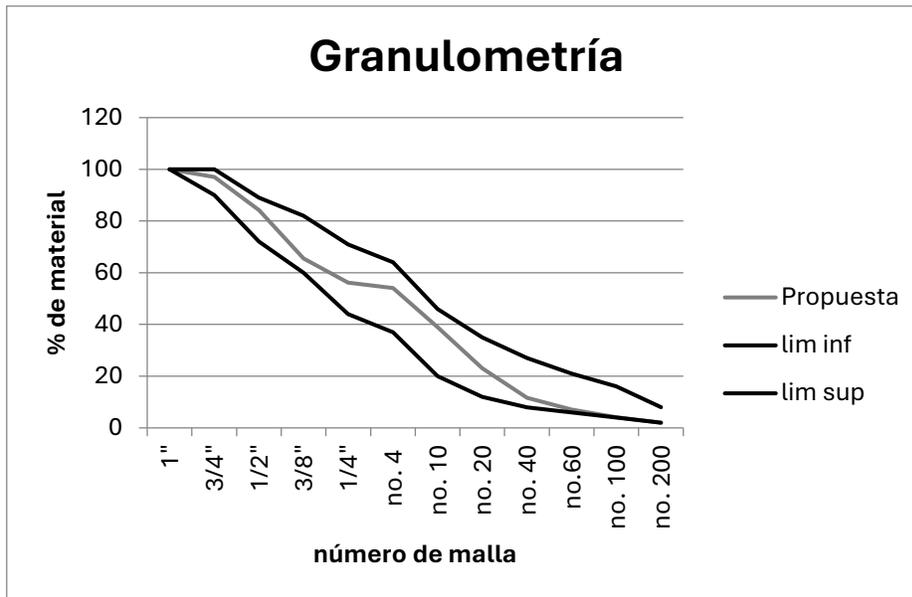


Figura 29 Gráfica de la granulometría densa para el diseño en mezcla asfáltica

Se tiene que la granulometría está dentro de los límites requeridos para poder pasar a generar la mezcla, está dentro de norma, tenemos muy justa la granulometría después de la malla número 60, pero estamos dentro del rango permitido. Cabe mencionar que se considera la adición del polvo de caucho respecto a este punto. Se habían considerado tres tipos de arenas y se procedió a realizar las pruebas de ellas solo una cumplió con los requisitos y fue de origen volcánico, por lo que fue la del banco de materiales de Joyitas

4.2.3 Partículas alargadas y lajeadas

Considerando la norma N-CMT-4-04-08 en su apartado de tablas en la número 2, están los valores considerados para esta investigación, en mezcla de asfalto en caliente con granulometría densa. Dichos datos para efectuar la comparación con los que se obtuvieron en el estudio en el laboratorio.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

TABLA 2.- Requisitos de calidad del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa (únicamente para $\Sigma L \leq 10^6$)

Característica	Valor
Densidad relativa, mínimo	2.4
Desgaste de Los Angeles; %, máximo	35
Partículas alargadas y lajeadas; %, máximo	40
Equivalente de arena; %, mínimo	50
Pérdida de estabilidad por inmersión en agua; %, máximo	25

Figura 30 Requisitos de calidad del material pétreo, fuente N-CMT-4-04-08

Se tienen como resultados los siguientes valores para la prueba de partículas alargadas:

Material retenido	Gramos	Se retien	Pasa
3/4"	34	0	34
1/2"	143	16	123
3/8"	67	19	40
1/4"	35	8	21
Total		43	218

Tabla 16 Prueba de partículas alargadas

Podemos concluir con el valor del resultado para las partículas alargadas que es de 15.4, esto comparado con la norma, estamos dentro del rango aceptable, ya que estas si exceden nos pueden causar un deslizamiento dentro de la mezcla y es poco favorable para el desempeño de esta, puede llegar a causar rupturas en el pavimento.

Material retenid	Gramos	Se retiene	Pasa
3/4"	34	34	0
1/2"	143	119	35
3/8"	67	41	16
1/4"	35	18	16
Total		212	67

Tabla 17 Partículas lajeadas

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

Considerando que la prueba se realiza por tres ocasiones estos valores presentados son el resultado del promedio de dichas pruebas, tenemos que es de 24.1% y la norma nos indica que máximo el 25 % así que estamos cumpliendo con el valor aceptable, consideramos que no cuenta con tantas partículas de manera lisa que llegan a afectar a la mezcla en su composición, ya que si estas exceden del valor de porcentaje, pueden causar un deslizamiento entre ellas y no tener una gran adherencia con el asfalto y las demás partículas.

4.2.4 Desgaste de los ángeles

Tenemos posterior a la realización de la prueba que nuestro valor nominal para dicho procedimiento es de 9.22%, siendo que estamos dentro del valor de Norma N-CMT-4-04 con respecto al tipo B por su composición y cargas abrasivas. Tenemos una buena resistencia a la trituración, la Norma nos indica que debe ser un máximo del 35% por lo que estamos muy por debajo del valor y es aceptable para el diseño.

Los agregados gruesos que se someten a la prueba tienden a tener una pérdida en masa, hasta de un 50 % como máximo.

4.2.5 Densidad en gravas

Peso gr	Volumen inicial ml	Volumen final ml	volumen grava	Densidad
248	400	498	98	2.53
256	209	313	104	2.46
244	204	296	92	2.65

Tabla 18 Densidad de grava

Tenemos por promedio el valor de la densidad relativa en gravas de 2.54 y la norma nos indica como mínimo un valor de 2.4, podemos decir que estamos dentro de los parámetros para la continuación de nuestra investigación.

4.2.6 Equivalente de arena

N-CMT-4-04/08

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

TABLA 2.- Requisitos de calidad del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa (únicamente para $\Sigma L \leq 10^B$)

Característica	Valor
Densidad relativa, mínimo	2.4
Desgaste de Los Angeles; %, máximo	35
Partículas alargadas y ladeadas; %, máximo	40
Equivalente de arena; %, mínimo	50
Pérdida de estabilidad por inmersión en agua; %, máximo	25

Figura 31 valores para mezcla asfáltica con granulometría densa

De la prueba realizada se obtuvo un valor para el porcentaje del equivalente de arena de 52% y la norma nos indica que debe estar como mínimo 40% por lo que si cumple con dicho parámetro.

4.2.7 Absorción en gravas

Muestra	Wi	Wf	%
1	300	287	4.33
2	300	290	3.33
3	300	289	3.67
Absorción			3.78

Tabla 19 Porcentaje de absorción en gravas

Por lo que tenemos un 3.78% de absorción en gravas. Generalmente tienen niveles de absorción entre el 0.2 % y el 4%. También es considerada la absorción capilar de los agregados ya que tienden a absorber respecto a la porosidad que estos contengan, se considera ya que usamos material pétreo de origen volcánico y triturado.

4.3 Pruebas no destructivas

4.3.1 Velocidad de pulso ultrasónico

En el método de velocidad de pulso ultrasónico, un pulso de onda ultrasónica a través del espécimen es creado en un punto sobre la superficie del objeto de prueba, y el tiempo que éste tarda en viajar de ese punto a otro es medido y comparado con los valores convencionales. Conociendo la distancia entre los dos puntos, la velocidad del pulso de onda puede ser determinada. Para la mayoría de

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

las configuraciones de prueba, esta resulta ser la onda de compresión directa, ya que es la más rápida. (Chávez, 2012)

Las pruebas se llevaron a cabo en las probetas con adición de fibras de PET al 2% y polvo de caucho al 1%, de acuerdo con los procedimientos especificados en la norma ASTM C597. Los transductores del dispositivo fueron calibrados con una barra de referencia; el gel se usó en la superficie de la muestra de la probeta para transmitir ondas ultrasónicas de manera más eficiente entre el transductor y el asfalto. La longitud de propagación de la onda tenía que ser lo suficientemente para no afectar los resultados. La distancia mínima de propagación ultrasónica para un transductor con una frecuencia de 54 kHz es igual a 150 mm. Para cada muestra se tomó una lectura, y la clasificación se presenta en la tabla siguiente:

Clasificación del concreto	Velocidad ultrasonica v (m/s)
Excelente	$V > 4575$
Bueno	4575 a 3660
Questionable	3660 a 3050
Pobre	3050 a 2135
Muy pobre	$V < 2135$

Tabla 20 Clasificación del concreto para prueba de velocidad ultrasónica



Figura 32 Prueba de pulso, Fuente propia

Se consideran los valores para concreto como ejemplo de comparación ya que no existen valores de mezcla asfáltica para dicha prueba.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

Los valores resultantes de las lecturas tomadas a las probetas de la mezcla asfáltica en caliente con la adición de fibras de PET al 2% y de polvo de caucho al 1%, son las que se muestran en la tabla número 21:

%de asfalto	altura cm	velocidad de pulso (m/s)
5.50	6.51	1 667
5.50	6.49	1 839
5.50	6.61	2 193
5.75	6.42	2 336
5.75	6.38	1 693
5.75	6.50	2 138
6.00	6.17	2 441
6.00	6.41	2 278

Tabla 21 Velocidad de pulso para probetas con adición de PET y caucho

Respecto a la prueba se tienen limitantes ya que no se pueden tener valores de comparación, se considera que respecto a la tabla número 21 tenemos una calidad promedio de las probetas, más no podemos concretar con la prueba al 100% de su capacidad.

Se le realizó solo a estos especímenes la prueba ya que no se contaba con el equipo por reparación, cuando se efectuaron las otras probetas, esto fue una limitante en el proceso.

4.4 Pruebas destructivas

4.4.1 Método Marshall

Ensayo estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall donde se tiene el siguiente material para poder efectuar la prueba destructiva en las probetas

- **Molde cilíndrico:** para las probetas con diámetro de 3.95”.
- **Desmolde de probetas:** disco con diámetro de 3.95” y 1/2” de espesor.
- **Martillo de compactación:** de operación mecánica.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

- **Horno o estufa:** donde se pueda calentar los agregados, el asfalto, los moldes, los materiales adicionales de reciclaje.
- **Mordazas:** se utilizan dos piezas la inferior que va encima de una base plana con dos varillas perpendiculares a ella (de ½” de diámetro o más), que sirven de guía para ensamblarla con la mordaza superior, sin que queden muy apretadas o sueltas
- **Máquina de compresión:** prensa mecánica o hidráulica, que pueda producir una velocidad uniforme de desplazamiento vertical de 50 mm/min.
- **Medidor de deformación:** deformímetro de lectura final fija, con divisiones en 0.25 mm o de mayor precisión.
- **Baño maría:** con profundidad suficiente de agua mínima de 30 mm sobre la superficie superior de las probetas compactadas.
- **Equipo misceláneo:** bandejas, charolas, recipiente con tapa, herramientas para mezclar, termómetros blindados, balanza, tamices, guantes, franela, cono, brocha, espátula.

TABLA 1.- Requisitos de calidad para mezclas de granulometría densa, diseñadas mediante el método Marshall

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)
Vacios en la mezcla asfáltica (VMC); %	3 - 5	3 - 5
Vacios ocupados por el asfalto (VFA); %	65 - 78	65 - 75

[1] ΣL = Número de ejes equivalentes de 8,2 t (ESAL), esperado durante la vida útil del pavimento.

[2] Para tráficos mayores de 10⁷ ejes equivalentes de 8,2 t, se requiere un diseño especial de la mezcla.

Figura 33 Fuente: N-CMT-4-05-003/16, Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras

4.4.2 Diseño Marshall

Se reporta como resultado de la ejecución del método Marshall para el diseño se utilizó un asfalto de grado PG 64 – 22, donado por la empresa Megas faltos, ubicada en la ciudad de Salamanca, asfalto suficiente para la realización de las probetas, a continuación, se relaciona en la tabla número 22 el diseño efectuado.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

Ensaye	Probeta		Masa Material Pétreo (950 gr)				Masa Asfalto (gr)	Masa Material + asfalto (gr)
	Núm.	C.A%	Grava (35%)	Sello (11%)	Arena A (47%)	Fino (7%)		
A	1,2,3	4	329	103.4	441.8	65.8	37.6	977.6
B	1,2,3	4.5	329	103.4	441.8	65.8	42.3	982.3
C	1,2,3	5	329	103.4	441.8	65.8	47	987
D	1,2,3	5.5	329	103.4	441.8	65.8	51.7	991.7
E	1,2,3	6	329	103.4	441.8	65.8	56.4	996.4
F	1,2,3	6.5	329	103.4	441.8	65.8	61.1	1001.1

Tabla 22 Peso material de probeta

Respecto a lo que refiere el diseño Marshall, se consideró por cada una de las mezclas realizadas sea presentada en las siguientes tablas número 23:

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

%de asfalto	altura cm	Peso gr			peso especifico gr/cm3	volumenes y vacios		Estabilidad kg Medida	flujo mm
		En aire	SSS	Agua		volumen agregados	%de vacios		
4.00	6.56	1077.90	1050.0	597.20	2.325	80.329	9.905	297.742	2.565
4.00	6.91	1101.20	1071.9	615.00	2.352	81.277	7.854	304.533	2.667
4.00	7.03	1098.10	1074.8	608.30	2.309	79.774	7.521	299.073	2.489
4.50	6.87	1104.00	1084.6	623.00	2.354	80.940	6.123	321.950	2.667
4.50	6.89	1108.50	1089.2	630.00	2.376	81.708	6.211	365.560	2.819
4.50	6.81	1084.10	1063.1	610.50	2.353	80.928	7.137	360.353	2.743
5.00	6.85	1112.70	1094.2	635.00	2.387	81.687	5.171	387.605	2.819
5.00	6.94	1107.60	1084.0	623.00	2.356	80.645	4.354	382.555	2.946
5.00	6.89	1110.30	1089.8	624.90	2.348	80.373	4.663	449.027	2.718
5.50	6.88	1126.40	1103.7	641.50	2.393	81.503	3.268	456.986	2.667
5.50	6.89	1120.10	1098.4	638.00	2.390	81.422	3.361	510.105	3.023
5.50	6.68	1094.50	1071.4	624.10	2.400	81.761	2.971	492.345	2.743
6.00	6.66	1120.50	1097.7	644.50	2.427	82.283	3.248	547.956	2.515
6.00	6.65	1120.90	1097.4	646.10	2.437	82.613	3.864	546.494	2.921
6.00	6.77	1118.00	1097.6	638.50	2.395	81.199	3.834	662.984	3.021
6.50	6.17	1041.70	1018.6	614.80	2.416	85.147	3.945	559.916	3.180
6.50	6.73	1128.30	1101.7	645.50	2.401	81.684	3.248	536.706	2.974
6.50	6.81	1127.90	1098.4	635.50	2.420	20.276	3.257	576.412	2.841

Tabla 23 Diseño para las probetas Método Marshall

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

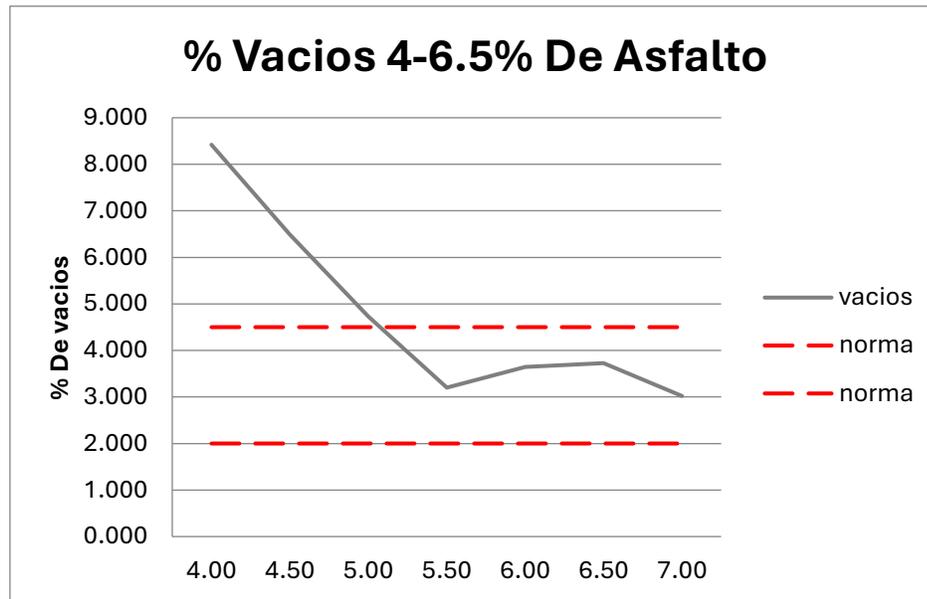


Figura 34 Porcentaje de vacíos para el rango del 4-6.5% de asfalto

Se considera que se tienen buenos resultados entre los valores de 5.5 % y el 6% de asfalto, para ello se procedió a efectuar una nueva corrida a cada 0.25% por lo que se tienen los valores del porcentaje de asfalto del 5.5%, 5.75% y 6%, descartándose los demás porcentajes de asfalto.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

%de asfalto	altura cm	Peso gr			peso especifico gr/cm3	volumenes y vacios		Estabilidad kg Medida	flujo mm
		En aire	SSS	Agua		volumen agregados	%de vacios		
5.50	6.76	1011.4	986.5	586.5	2.473	84.04	2.86	493.54	2.85
5.50	6.74	1022.3	994.6	592.7	2.482	83.73	2.54	444.11	2.74
5.50	6.63	1014.8	986.5	585.2	2.466	83.17	3.14	385.72	2.45
5.75	6.25	980.7	964.1	563.2	2.409	81.08	3.98	638.17	2.92
5.75	6.34	1006.3	988.9	582.1	2.435	81.96	3.94	589.78	3.35
5.75	5.89	986.9	959.2	567.4	2.455	83.64	3.15	598.34	3.15
6.00	6.51	1004.9	983.6	576.1	2.419	80.85	3.21	580.16	3.18
6.00	6.86	1007.6	979.5	571.8	2.409	80.89	3.58	539.40	3.00
6.00	6.73	1006.9	987.2	581.7	2.439	81.9	3.39	562.41	2.85

Tabla 24 Diseño Marshall con porcentajes del 5.5-6 % a cada 0.25

Para las probetas con la adición de PET se muestra la de mejor desempeño siendo esta con el 2% de fibras de PET y con porcentajes de asfalto del 5.5%, 5.75% y 6%.

Para las probetas con la adición de polvo de caucho se muestra la de mejor desempeño siendo esta con el 1% de polvo de caucho y con porcentajes de asfalto del 5.5%, 5.75% y 6%.

%de asfalto	altura cm	Peso gr			peso especifico gr/cm3	volumenes y vacios		Estabilidad kg	flujo mm
		En aire	SSS	Agua		volumen agregados	%de vacios		
5.50	6.4	1026.1	1002.1	556.5	2.254	76.3	11.46	789.45	3.07
5.50	6.38	1021.7	992.5	549.8	2.457	75.84	11.69	710.29	2.99
5.50	6.16	1003.5	979.8	532.7	2.196	74.09	10.72	647.91	2.81
5.75	6.65	995.7	966.3	553.1	2.346	78.94	7.4	630.26	3.2
5.75	6.39	1024.9	993.1	558.2	2.299	77.08	9.66	505.42	3.4
5.75	6.53	1018.1	989.3	567.5	2.352	79.16	7.23	452.65	3.27
6.00	6.24	1016.4	988.6	583.7	2.449	82.21	3.04	538.01	2.64
6.00	6.54	1027.1	1001.4	586.4	2.419	81.23	2.9	532.51	2.84
6.00	6.09	977.5	939.6	556.8	2.465	82.75	2.4	527.18	3.3

Tabla 25 Diseño Marshall con adición del 1 % de polvo de caucho

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

Para las probetas con la adición de PET se muestra la de mejor desempeño siendo esta con el 2% de fibras de PET y con porcentajes de asfalto del 5.5%, 5.75% y 6%.

%asf	FLUJO DE POLVO DE CAUCHO					Limite superior	limite inferior
	1%	2%	3%	4%	convencional		
5.5	2.96	3.42	3.48	3.03	2.69	4.00	2.00
5.75	3.29	4.39	4.29	2.91	3.14	4.00	2.00
6	2.93	4.06	4.45	2.48	3.04	4.00	2.00

Tabla 26 Resumen del flujo para la adición de polvo de caucho

%de asfalto	altura cm	Peso gr			peso específico gr/cm ³	volumenes y vacios		Estabilidad kg Medida	flujo mm
		En aire	SSS	Agua		volumen agregados	%de vacios		
5.50	6.4	1011.4	986.5	586.5	2.47	83.42	2.86	477.78	3.86
5.50	6.38	1022.3	994.6	592.7	2.48	83.73	2.5	427.66	2.74
5.50	6.16	1014.8	986.5	585.2	2.46	73.18	3.14	411.5	2.49
5.75	6.65	980.7	964.1	563.2	2.41	81.08	4.98	647.41	2.92
5.75	6.39	1006.3	988.9	592.1	2.43	81.96	3.95	580.35	3.35
5.75	6.53	986.9	959.2	567.4	2.45	82.64	3.15	640.33	3.15
6.00	6.24	1004.9	983.6	576.1	2.42	81.23	4.2	415.83	3.28
6.00	6.54	1007.6	979.5	571.8	2.41	80.9	4.58	483.03	3.01
6.00	6.19	1006.9	987.2	581.7	2.44	81.91	3.39	511.14	3.76

Tabla 27 Diseño Marshall con adicción del 2 % de Fibras de PET

%asf	FLUJO DE FIBRAS DE PET						Limite superior	limite inferior
	1%	1.5%	2%	3%	4%	convencional		
5.5	3.44	2.68	3.03	3.48	3.45	2.69	4.00	2.00
5.75	4.00	3.21	3.14	4.12	4.29	3.14	4.00	2.00
6	3.40	3.19	3.34	4.32	4.45	3.04	4.00	2.00

Tabla 28 Resumen del flujo con adicción de fibras de PET

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

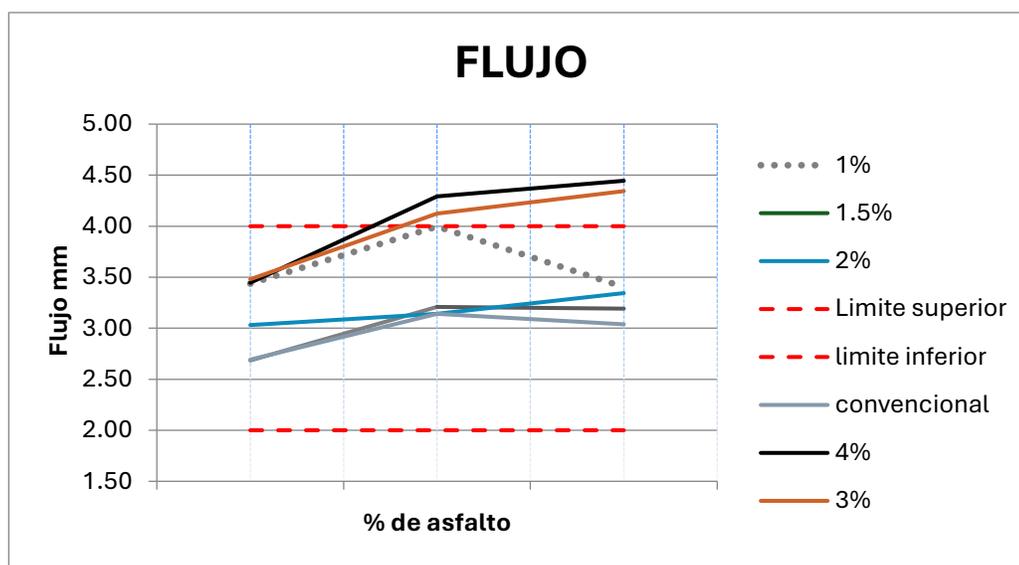


Figura 35 Grafica del resumen del flujo para la adición de fibras de PET

%asf	ESTABILIDAD DE FIBRAS DE PET					convencion al	norma Kg
	1%	1.5%	2%	3%	4%		
5.5	3.41.4	468.38	438.98	655.97	594.21	441.12	544.31
5.75	6.69.63	586.08	622.70	551.29	562.17	608.75	544.31
6	478.32	727.42	470.01	432.35	355.27	560.66	544.31

Tabla 29 Resumen de estabilidad con adición de fibras de PET

%asf	%de vacíos					convencional	limite inferior	limite superior
	1%	1.5%	2%	3%	4%			
5.5	3.44	2.45	2.84	7.59	12.85	2.60	3.00	5.00
5.75	4.00	3.21	4.03	7.52	13.37	4.03	3.00	5.00
6	3.40	3.27	4.07	7.39	11.14	4.22	3.00	5.00

Tabla 30 Resumen de % de vacíos para adición de fibras de PET

Para las probetas con la adición de fibras de PER y el polvo de caucho se muestra la de mejor desempeño siendo esta con el 2% de fibras de PET y el 1% del polvo de caucho, con porcentajes de asfalto del 5.5%, 5.75% y 6%.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

%de asfalto	altura cm	Peso gr			peso específico gr/cm3	volumenes y vacios		Estabilidad kg	flujo mm
		En aire	SSS	Agua		volumen agregados	%devacios		
5.50	5.99	976.5	959.5	571.4	2.47	83.55	2.71	758.56	2.89
5.50	6.39	1029.9	1010.6	597.1	2.45	82.64	3.81	700.75	3.41
5.50	6.51	1048.7	1026.5	604.9	2.44	82.31	4.15	626.99	3.32
5.75	6.28	1019.8	1002.9	591.8	2.44	82.24	3.62	703.39	3.42
5.75	6.31	1013.3	996.8	589.3	2.45	82.46	3.36	751.68	3.2
5.75	6.35	1035.0	1010.1	594.8	2.43	82.06	3.83	762.43	3.35
6.00	6.40	1038.9	1023.7	599.7	2.42	81.86	4.25	596.55	3.09
6.00	6.42	1007.0	991.9	580.5	2.41	81.07	4.38	517.16	3.41
6.00	6.42	1013.5	992.9	581.3	2.42	81.16	4.28	589.32	3.12

Tabla 31 Diseño Marshall con adición del 1% de polvo de caucho y el 2% de fibras de PET

%de asfalto	5.5	5.75	6
%de vacios en la mezcla			
Densidad			
%vacíos en los agregados			
Flujo			
Estabilidad			
Asfalto optimo %			
Densidad, gr/cm3			
Estabilidad, Kg			
Flujo, 0.01"			
Vacio mezcla, %			
Vacios en los agregados, %			

Tabla 32 Resumen del Diseño Marshall con la adición de fibras de PET al 2 % y polvo de caucho al 1 %.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

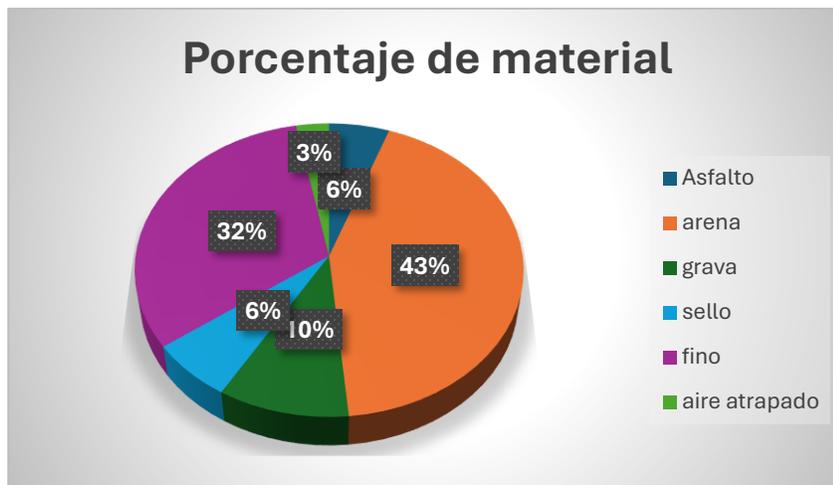


Figura 36 Porcentaje de material usado para una mezcla asfáltica en caliente

De acuerdo con la figura anterior se muestra la importancia que tienen los agregados pétreos, ya que estos constituyen un 91.5% de la mezcla del volumen total, el contenido del aire atrapado oscila entre un 2 - 5 % del volumen. Las condiciones del buen uso y manejo de los materiales pétreos en la utilización correcta nos proporcionan un diseño por durabilidad con impacto de material más sustentable.

4.5 Elaboración de probetas

Las probetas deberán de cumplir con las siguientes características que se establecen para tener un control de calidad y manejo adecuado de ellas.

Diámetro: 10 cm

Altura: 6 cm (mínimo)

Peso: 940 gramos

Primeramente, se pesan los materiales pétreos (fino, arena, sello y grava), se colocan en dos charolas para calentarse a una temperatura de 130 ° C, son colocados fino y arena en la primera charola de metal y en la segunda se colocan sello y grava, en un molde de metal se inserta el asfalto para ser calentado en la estufa entre los 140 a 145 ° C.

Se vierte en la charola uno, el asfalto en gramos se mezcla en la llama y se vierte enseguida la charola dos, se prepara el molde, previamente caliente a 120° C

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

en el horno, se engrasa y coloca en la máquina, se procede a verter el material con ayuda de un cono de metal, se dan 25 puntos de varilla en forma circular para proceder a iniciar la compactación, dicha compactación es de 50 golpes por lado, se desmolda la probeta pasados 30 a 40 minutos. se marcan cada una de las probetas con el porcentaje y la colocación de material, tal como se muestra el ejemplo en la figura, donde se coloca también el número de espécimen en un costado para que se identifique de manera rápida.



Figura 37 Probeta con el 5.5% de asfalto para el 3% de PET

Para un asfalto convencional (PG 64-22), las temperaturas de mezclado estarán en un rango entre 145 – 160°C, se aplica la preparación a temperatura ambiente.

La densidad de las probetas se obtiene posterior a desencofrar, se procede a medir el diámetro y la altura de cada una de ellas con ayuda de un vernier, se registra como peso seco o en aire de las probetas, se les coloca parafina evitando dejar la superficie de estas con ranuras que permitan la filtración del agua, se pesan nuevamente para ser colocado el valor en la tabla, por último se sumergen en agua y se cuantifica su valor de peso, considerando que absorban no más del 2% de agua respecto a su volumen.

Para la investigación se tienen cuatro tipos de mezclas y sus resultados visuales se muestran en la siguiente figura:

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”



Figura 38 Probetas convencionales, Método Marshall

En la figura 40 se puede apreciar las probetas utilizadas para la comparación de esta investigación, son las probetas convencionales con el porcentaje de asfalto de 4 - 6% siendo 18 probetas las que se generaron para poder hacer el diseño con la adicción de materiales reciclados.

Estas probetas están dentro de los parámetros que nos marca la Norma.



Figura 39 Probetas con el 1.5% de PET probadas en método Marshall

Para el estudio, se realizó una prueba con el 1.5% de PET ya que se quería sacar el mejor resultado de comportamiento en la prueba, sin embargo, se procedió a seguir con el 2% ya que este si cumple con los límites de la norma y con el 1.5% de las fibras de PET está por debajo de la norma en el flujo y la densidad.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”



Figura 40 Probetas con adición de polvo de caucho, probadas método Marshall

Las probetas con la adición de polvo de caucho al ser sometidas al baño maría absorbieron un poco de agua y estas generaban una reacción de esponjamiento, sin embargo, no fue hasta el punto del 4% del polvo de caucho en donde se presentaron las anomalías para ser probadas en la maquina Marshall, ya que en varias ocasiones se tronaron antes de ser probadas, sus rasgos más visuales fueron el esponjar, la sensibilidad del material con el calor, se procuró cubrir todos los porcentajes para efectuar la comparación con la convencional y se consideró el mejor resultado con el 1% de polvo de caucho.

Podemos decir que su textura puede dar un mejor uso y manejo al usuario, ya que este tiende a tener una deformación y recomposición de manera inmediata, nos permite que los neumáticos tengan una fricción adecuada. Al realizar el calentamiento de la mezcla con la revoltura del caucho se implementó al final para evitar tener una mayor contaminación por los gases que tiende a expulsar por ser calentado el caucho.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”



Figura 41 probetas con adición de fibras de PET probadas en método Marshall

Las probetas que se realizaron con la adición de las fibras de PET se observaron en su proceso que las fibras no se reducen a menos que estas llegaran a tener una temperatura elevada, pero si hacemos eso las propiedades del asfalto se reducen en su vida útil y se genera un envejecimiento rápido, siendo esto algo contraproducente, por ello solo se revolvieron a la misma temperatura del asfalto y los agregados a 135 -145 ° C.

Cabe destacar que después de ser probadas las probetas en el método Marshall se podían aun visualizar las fibras que estas contenían, siendo así que las fallas no se daban a causa de ellas.

4.6 Flujo

El flujo en las mezclas asfálticas se obtiene después de ser probadas todas las probetas, se tiene como resultado en resumen las siguientes graficas:

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

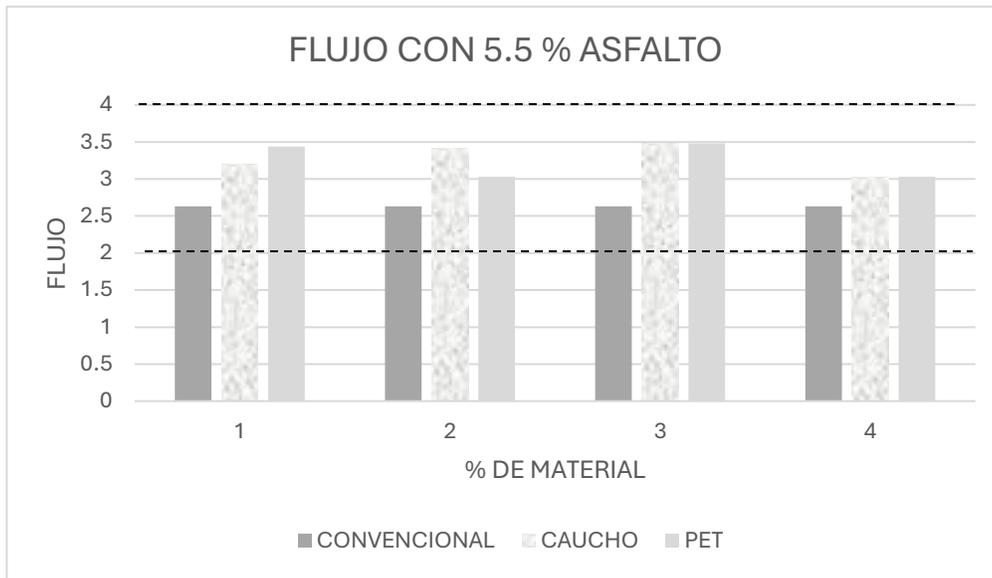
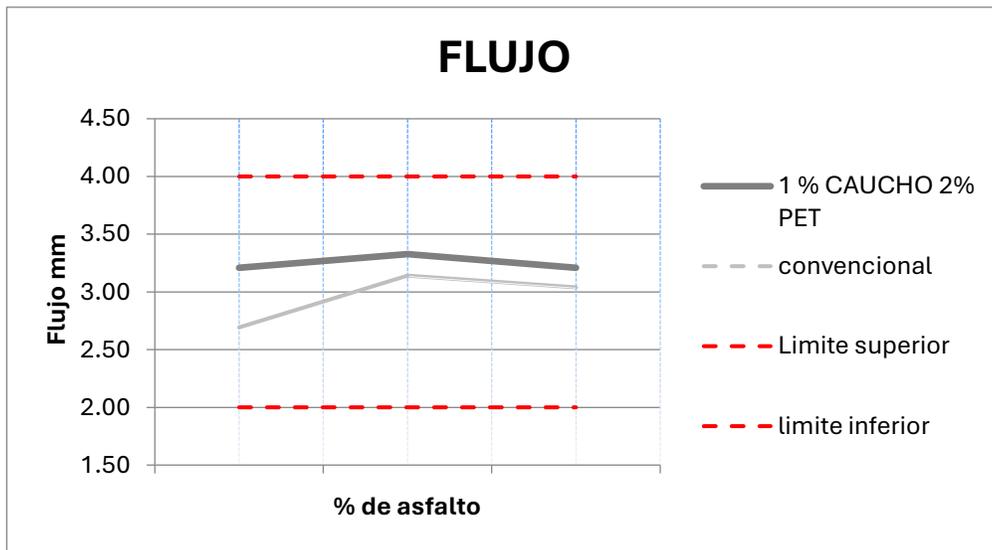


Figura 42 Grafica del flujo con 5.5% de asfalto

Tenemos que el límite inferior del flujo respecto a norma es de 2 y el máximo es 4, para los tres casos estamos dentro del rango, por lo que es el de mejor respuesta, ya que con el 5.75% y el 6% no cumplen con la mayoría de los porcentajes las probetas de caucho.



“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

		FLUJO				Limite superior	limite inferior
		1%	2%	3%	4%		
5.5 asf	PET	3.44	3.03	3.48	3.45	4.00	2.00
	CAUCHO	2.96	3.42	3.48	3.03	4.00	2.00
	PROBETA	2.69	2.69	2.69	2.69	4.00	2.00
5.75	PET	4.00	3.14	4.12	4.29	4.00	2.00
	CAUCHO	3.29	4.39	4.29	2.91	4.00	2.00
	PROBETA	3.14	3.14	3.14	3.14	4.00	2.00
6	PET	3.40	3.34	4.34	4.45	4.00	2.00
	CAUCHO	2.93	4.06	4.45	2.48	4.00	2.00
	PROBETA	3.04	3.04	3.04	3.04	4.00	2.00

Tabla 33 Resumen del flujo

Por lo que podemos observar en la tabla anterior el flujo que se tiene en los tres tipos de probetas se considera que el de mejor resultados es con el 1% de fibras de PET y polvo de caucho para el 5.5 % de asfalto

4.7 Porcentaje de vacíos

Respecto al porcentaje de vacíos que tenemos de respuesta en las probetas se muestra la siguiente gráfica:

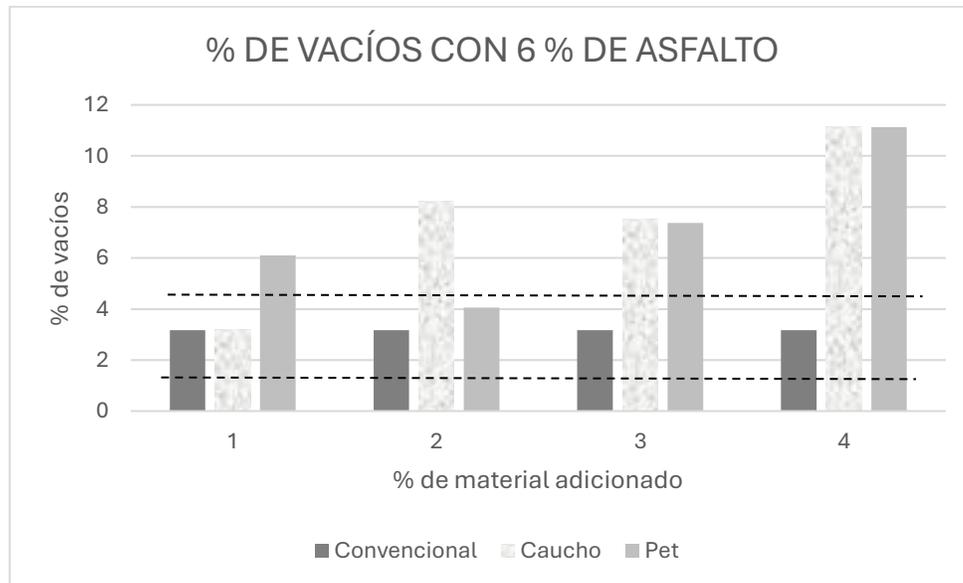


Figura 43 Grafica de porcentaje de vacíos

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

%material adicionado	Convencional	Caucho	Pet
1.0	3.17	3.21	6.1
2.0	3.17	8.23	4.06
3.0	3.17	7.51	7.38
4.0	3.17	11.13	11.13

Tabla 34 Porcentaje de vacíos

Donde tenemos los valores de Norma como límite superior 4.5 % y el límite inferior es de 2 %, nuestras muestras de probetas nos arrojan un resultado para el 6% de asfalto un flujo promedio de 3.17 para la convencional, en la probeta con PET solo una de las 4 está dentro de norma con el 1% de adición de caucho y en el PET nos da el 4.06 para el 2%.

Tenemos vacíos altos y una estabilidad satisfactoria ya que con los altos contenidos de vacíos la carpeta asfáltica se vuelve permeable. Se está generando dentro de la estructura una reacción química de un endurecimiento prematuro del asfalto. Por lo que se deben de considerar los ajustes para la reducción de los vacíos.

4.8 Estabilidad

Las probetas fueron sumergidas en baño maría de 60° C + - 1° C, durante 40 minutos antes de la prueba, para que este sea sometido al cambio de temperatura y verificar si su composición estructural es adecuada, ya que el agua es el principal fenómeno que daña de manera constante a la carpeta asfáltica.

El método Marshall está diseñado para tamaños máximo de 38 mm debido a que la prueba de estabilidad es de naturaleza empírica.

%material adicionado	Convencional kg	Caucho kg	Pet kg
1.0	641.67	786.56	359.41
2.0	641.67	410.42	342.04
3.0	641.67	655.97	655.97
4.0	641.67	342.04	342.04

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

Tabla 35 Resultados de la estabilidad

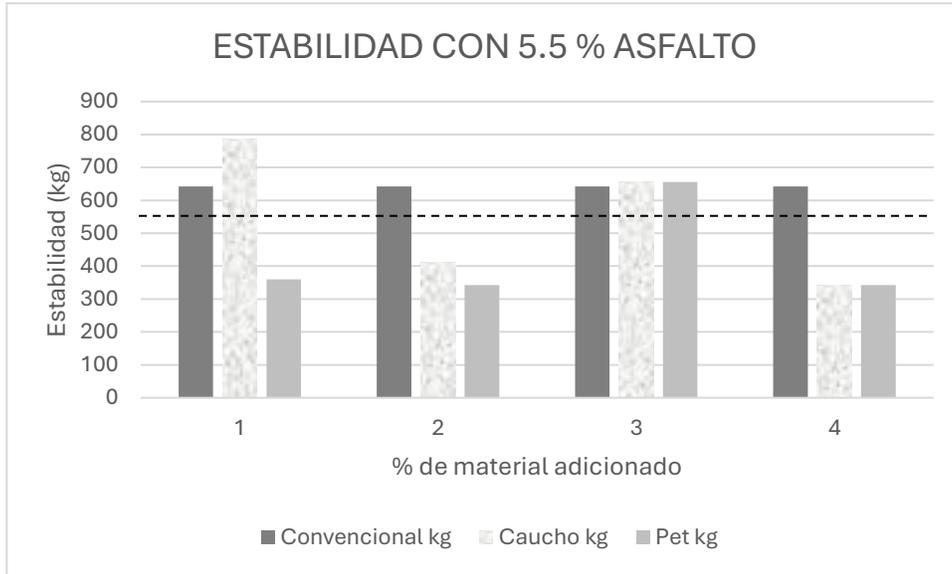


Figura 44 Grafica de estabilidad con las tres mezclas de las probetas con el 5.5% de asfalto

Para la estabilidad se utiliza el factor de corrección

Se encontró que con el 5.5% de asfalto agregado en las mezclas con adición de fibras de PET la estabilidad en el 3% es el de mejores resultados con valor promedio de 645 kg.

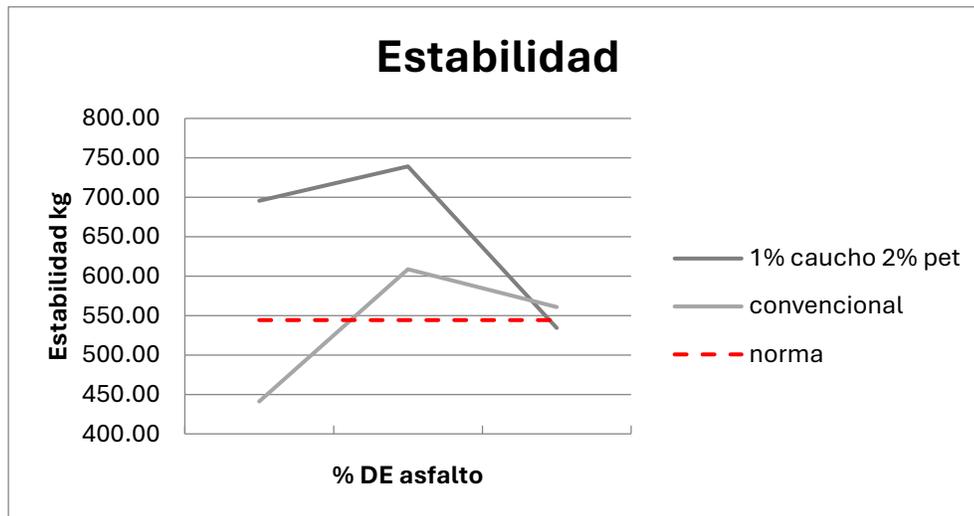


Figura 45 Estabilidad con el 2% de fibras de PET y el 1 % de polvo de caucho

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

CAPITULO IV DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y ANALISIS

5.1 Discusión

Cabe destacar como ya se mencionó en la literatura de esta investigación que la aportación de esta será con el principal objetivo de darle un uso adicional a los materiales reciclados, tal como lo son el PET y el caucho.

Estudios previos han señalado la importancia de la implementación de nuevos métodos para el uso de productos reciclados, siendo introducidos en la construcción para la mejora de las cualidades físico – mecánicas de dicho material.

En cuanto a la inspección visual sobre los especímenes fallados, en las Figuras se muestra que no existe un patrón para poder ser clasificados, ya que tanto para el subgrupo de adición de PET, se muestran probetas con la fractura interna y solo visual se ven deformadas, en otras se corrobora que están fracturadas a la mitad y/o en los costados, por ello es por lo que no se puede llegar a tener una clasificación de las fallas, como para el subgrupo del polvo de caucho, se presentan similares los tipos de falla ya que estas son en particular como las de las fibras de PET donde no se pueden clasificar por el porcentaje. Se observa agua en el interior de los especímenes y en algunos casos la fractura atraviesa uno de los agregados gruesos, debido a su baja calidad. No obstante, no hay un tipo de falla asociado al proceso de acondicionamiento o al contenido de las fibras de PET.

5.2 Estabilidad, flujo y porcentaje de vacíos

En este estudio se encontró una fuerte evidencia significativa entre el comportamiento del Flujo y la estabilidad cuando se adiciono las fibras de PET en la mezcla caliente, siendo que no se detectó un aumento en la aplicación de la adición del polvo de caucho con las fibras de PET en la mezcla en caliente.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

5.3 VAM y VFA

Este se refiere al espacio entre partículas de agregado en una mezcla asfáltica, está compuesto de los vacíos de aire de la mezcla y el volumen de asfalto efectivo.

Tabla 1.3 Vacíos en el agregado mineral (VAM) para mezclas asfálticas de granulometría densa.

Tamaño nominal (TN) del material pétreo utilizado en la mezcla [2]		Para 4 % de Vacíos de aire en la mezcla asfáltica
mm	Designación	Vacíos en el agregado mineral (VAM) % , mínimo
9,5	$\frac{3}{8}''$	15
12,5	$\frac{1}{2}''$	14
19	$\frac{3}{4}''$	13
25	1''	12
37,5	1½''	11

Figura 46 Vacíos en el agregado mineral, granulometría densa

Fuente: <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt602.pdf>

El efecto generado por los vacíos de asfalto, ya que el VFA llega a restringir el contenido de aire permitido. Las mezclas con asfalto caliente diseñadas para tránsito menor a un millón de ejes equivalente, no pasaran el criterio del VFA con un porcentaje mayor del 5% con el único propósito de evitar mezclas menos durables.

CAPITULO V CONCLUSIONES

El objetivo principal de esta investigación consistía en analizar el desempeño de una mezcla asfáltica en caliente con adicción de fibras de PET y polvo de caucho (material que se retiene en la malla número 60), por medio del análisis de sus propiedades viscoelásticas, la resistencia a la fractura y la susceptibilidad de la mezcla al daño causado por el exceso de humedad.

Del ensayo se puede concluir:

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

A lo largo de esta investigación se fabricaron cuatro tipos de mezclas: convencional, con adición de fibras de PET, con adición de polvo de caucho y por último con adición de fibras de PET con polvo de caucho.

Los altos porcentajes de asfalto en la mezcla en caliente producen una reducción en la fricción interna de la carpeta asfáltica.

La mezcla densa con valores de estabilidad altos y una baja susceptibilidad a la humedad, nos indica el agrietamiento por fatiga, caso que se dio con la aplicación de la adición del polvo de caucho.

Se establecen las condiciones y uso de fibras de PET, así como el polvo de caucho en la mezcla asfáltica en caliente, para un flujo vehicular de un millón de ejes equivalentes, respecto a la Norma.

Los mejores resultados en la mezcla convencional fueron 5.5% y 6% de asfalto, para ello se efectúa un nuevo ajuste a cada 0.25% de asfalto para poder comprobar su comportamiento, siendo esto que se mejoran entre el 5.5% y 5.75%, por lo que fueron usados los porcentajes de 5.5%, 5.75% y 6% de asfalto para la adición de fibras de PET, así como del polvo de caucho.

Se tiene para las probetas convencionales que el flujo es de 2.4 mm, la estabilidad de 649kg con un 5.5 % de asfalto, el porcentaje de vacíos nos resultó de mejor respuesta con un 2 % de asfalto dando un valor del 2%.

Respecto a los resultados de la mezcla con adición de fibras de PET de 2.5 cm x 2 mm, se tiene que el flujo es de 2.8 mm, la estabilidad de 652 kg con un 5.75 % de asfalto, el porcentaje de vacíos nos resultó de mejor respuesta con un 2% de asfalto dando un valor del 1.5%.

Hablando sobre los resultados de la mezcla con adición de polvo de caucho que se retiene en la malla número 60 - 200, se tiene que el flujo es de 3.1 mm, la estabilidad de 540 kg con un 5.5 % de asfalto, el porcentaje de vacíos nos resultó de mejor respuesta con un 2 % de asfalto dando un valor del 1%.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

CAPITULO VI RECOMENDACIONES

Antes de llevar a cabo una nueva investigación respecto a la adición de fibras de PET y polvo de caucho se requerirá una mayor investigación en el tema de la Pirolisis y sus afectaciones.

Se sugiere realizar la mezcla asfáltica con poca cantidad de material reciclado debido a que, si se desarrolla una mezcla que supera el 25 % del peso total, esta no va a trabajar de forma adecuada y no se presentara mejoras en su mecanismo, basándonos en trabajos ya efectuados en artículos y tesis.

Se sugiere utilizar el plástico PET como aditivo en la etapa caliente, ya que, si se reemplaza el PET por el agregado grueso, este no presentará ninguna mejora y no será viable.

Cabe resaltar que el agregado grueso otorga resistencia a la mezcla asfáltica, por lo que se debe de considerar desde un principio sus propiedades, ya que este deberá de cubrir un mínimo del agregado grueso.

Se recomienda fomentar el desarrollo de propuestas sustentables, para reducir el índice de contaminación generados por los plásticos que se presentan en la actualidad con el fin de agilizar su uso y método de acopio.

Se recomienda efectuar las pruebas siempre tomando en cuenta las normas establecidas y los parámetros indicados en cada una de ellas, tomar en cuenta que se debe efectuar cada una de ellas con un sistema de seguridad óptimo.

Se recomienda constantemente estar teniendo retroalimentación de las investigaciones similares, para verificar si se va por un buen camino, si alguien más ha encontrado nuevas técnicas de uso y procesos.

Entre las futuras y posibles preguntas de investigación que pueden formularse a partir de los resultados en esta investigación se encuentran: ¿Cuánto es el nivel de porcentaje que se puede utilizar en la adición sin afectar los parámetros de norma?, ¿Pueden reducirse los gases tóxicos emergidos por la

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

mezcla con sustancias químicas?, ¿Con qué facilidad se puede reproducir esta mezcla?, ¿Existirá alguna otra alternativa para la adición de fibras de PET y polvo de caucho en una mezcla asfáltica?

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece el soporte de la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, CIC-UMSNH; del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología, CONAHCYT, con los Proyectos de Ciencia de Frontera de Grupo, CF-2023-G-985, con el de Investigadores Consolidados, CBF 2023-2024-1613, y el PRONACE 321260; del ICTI, Instituto de Ciencia Tecnología e Innovación del Gobierno del Estado de Michoacán con los Apoyos a las Capacidades Científicas; y el soporte técnico y humano del Laboratorio Ing. Luis Silva Ruelas del Departamento de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH.

Agradezco de manera amplia la dedicación que me brindo durante estos dos años mi asesor el Dr. Hugo Luis Chávez García, quien siempre conté con él para darme sus consejos y desde el primer día de universidad me brindo su conocimiento siendo muy respetuoso y propio respecto a sus actividades docentes. Le estoy infinitamente agradecida por todo lo que en mi inculco. Pido que la vida le otorgue lo mejor para él y sus seres queridos.

Hago extensa la gratitud de igual manera para mi co-asesora la Dra. Elia que siempre me brindo su mano para platicar mis dudas, darme esa dicha de indagar dentro de mí y sacar la mejor versión, a cada uno de mis maestros que estuvieron a lo largo de este proceso y durante cada uno de mis días dentro de la facultad, me voy con el mejor regalo de la vida que es la dicha de poder tener el conocimiento.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

DEDICATORIA

Principalmente le dedico esta tesis a mi hijo Dustin Aaron Vargas Silva, ya que desde que inicie mis estudios siempre fue quien me acompañó a clases, quien me daba el aliento de seguir con el objetivo y no dejar por nada la dicha de seguir siendo su mamá para prepararme y brindarle una vida más placentera, sé que en muchas de las ocasiones no podía asistir a sus actividades ni estar presente en los momentos que son tan más simples, pero él sabe que este esfuerzo lo hice y lo seguiré haciendo por nuestro bienestar.

Deseo que el algún día me dé la dicha de verlo ser un ser exitoso y pleno de felicidad en el ámbito que más dese, no considero que sea una mala decisión la que tome al ser su madre y por ello siempre eh buscado brindarle lo mejor...

Sin ti mi vida no sería tan bella, como la pintas cada día que te miro al despertar, como esos lindos abrazos que me das y me dices “TE AMO MAMÁ” ...

Te amo de aquí a la última estrella en pasitos de tortuga de ida y vuelta mi precioso hijo ...

La parte importante de todo esto también es agradecerle a mi madre que me brindo de manera incondicional sus palabras, su ayuda, su tiempo y dedicación para mí y mi hijo, no tengo manera de como pagarle en vida por todo lo que ella por nosotros ha hecho, soy plenamente dichosa de poder seguir teniéndola en mi vida y de permitirme cuidarla, pasar el tiempo con ella y hacer nuestras actividades juntas, a pesar de que no siempre soy la mejor hija...

Todos los días los dedico a ser mejor que el día anterior, brindo por la felicidad de poder decirle que gracias por confiar en mi cada día. No te defraudare...

Lo logramos ...

Agradezco a mis tías, a cada uno de mis primos y sobre todo a mi familia por estar para mí en cada momento crucial de mi vida, que siempre me brindan su amor cálido y creen en mi potencial.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

Le estoy infinitamente agradecida a los compañeros que durante el proceso me apoyaron con sus ideas, sus palabras de aliento y sabiduría, sin ningún motivo, sabiendo que me eran muy alentadoras, también a mis maestros que nunca dejaron de creer en mí y que a lo largo de este tiempo logramos formar un vínculo mayor al esperado.

A mis chicos del servicio Miguel, Geovanni, Ángel, Gilberto, Gabriel, Axel, Diego y Monse que sin dudarlo y sin esperar nada a cambio siempre estaban para brindarme su apoyo en la realización de pruebas, las horas que pasamos en laboratorio y las pláticas nunca las olvidare. Les estoy muy agradecida mis niños...

Les agradezco a mis compañeros de la Maestría de Ciencias de la Ingeniería Ambiental, que siempre me brindaban de su conocimiento que no dudaban en apoyarme en lo que requiriera, especialmente a mis compañeras Danna y Yesi.

No olvidare el cariño que me dieron todos ellos en los momentos más felices que pasamos juntos.

A mi maestro Marco le agradezco porque el siempre está para brindarme su apoyo, sin dudarlo es un gran ser que merece ser compensado por la vida con lo mejor.

Por último, le agradezco a mis compañeros de laboratorio Fabricio, Alberto, Miguel, Ramsés y Aldo, por todo lo que por mi hicieron en el transcurso de la maestría.

Solo diré que la vida me dio más de lo que imagine y estoy jubilosa de ser tan dichosa de tenerlo todo ...

“No hay sueño que no se cumpla, si cada día estas persiguiéndolo ...”

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

REFERENCIAS

- Alba Cristina Vides. (2013). *COMPARACIÓN DEL DESEMPEÑO ENTRE MEZCLAS ASFÁLTICAS MDC-2 ENVEJECIDAS EN LABORATORIO Y MEZCLAS EN SERVICIO EN BOGOTÁ*.
- Alejandro Martínez. (2003). *Betunes asfálticos materiales muy utilizados y poco conocidos químicamente*.
- Augustine. (2013). *Analytical and applied Pyrolysis*. 101, 1–16.
- Ávila Córdoba, L., Martínez-Barrera, G., Barrera Díaz, C., Ureña Núñez, F., & Loza Yáñez, A. (2013). *Effects on mechanical properties of recycled PET in cement-based composites*. *International Journal of Polymer Science*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/763276>
- Berrío Álzate, A. (2017). *Diseño y evaluación del desempeño de una mezcla asfáltica tipo MSC-19 con incorporación de Tereftalato de Polietileno reciclado como agregado constitutivo*.
- Bolaños Zea, J. J. G. (2019). *Reciclado de plástico PET*. Universidad Católica San Pablo.
- Cámara de Diputados, Congreso De, D. H., Unión, L. A., & Ley, N. (2023). *LEY GENERAL PARA LA PREVENCIÓN Y GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS*.
- Censos económicos. (2019). INEGI. INEGI.
- Chávez, H. (2012). *Análisis comparativo entre técnicas no destructivas y destructivas aplicadas a la caracterización del concreto hidráulico elaborado con agregados volcánicos y cemento*.
- Chong-Qing Wang. (2015). <https://doi.org/10.1155/2015/123456> Separation of polyethylene terephthalate from municipal waste plastics by froth flotation for recycling industry.
- De, A., Estabilidad, L. A., & La, M. (2019). *UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍA CIVIL CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL Tesis de investigación. UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO*.
- Dr. Horacio Delgado Alamilla. (2020). *Diseño de mezclas asfálticas densas en caliente en función del nivel de tránsito*.
- Juan Carrillo, M. M. (2020). *ECOCE. ¿Qué Hacemos?*
- Esther Pinedo. (2019). *Diseño de pavimento flexible con la utilización de polvo de caucho reciclado para minimizar la generación de fisuras del Jr. Jorge Chávez*. Escuela Profesional de ingeniería civil.
- Francisco Castillo. (1997). *Tecnología del concreto*.
- Figuerola Infante, A. S., & Fonseca Santanilla, E. (2020). *Desempeño del pavimento con mezcla reciclada-RAP y grano de caucho reciclado-GCR*. *Infraestructura Vial*, 22(39), 20–28. <https://doi.org/10.15517/iv.v22i39.41205>
- Gambino Martínez, J. S., Bautista-Zapata, T. I., Torrado-Gómez, L. M., Serrano Guzmán, M. F., & Pérez Ruiz, D. D. (2023). *Eco ladrillos: alternativa para aprovechamiento de arcilla y grano de caucho reciclado*. *Inquietud Empresarial*, 23(1), e15699. <https://doi.org/10.19053/01211048.15699>

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

- INEGI. (2022). COMUNICADO DE PRENSA NÚM. 310/22 2 DE JUNIO DE 2022 PÁGINA 1/4 COMUNICACIÓN SOCIAL ESTADÍSTICAS A PROPÓSITO DEL DÍA MUNDIAL DEL MEDIO AMBIENTE (5 DE JUNIO).
- INEGI. (2023). REVISTAXXIIJIMA. Jornada Institucional Del Medio Ambiente, XXII.
- Javier Arbonés Villaverde, J. C. (2001). Enciclopedia Temática Tesoro de la Juventud siglo XXI (REYMO S.A. DE C.V., Ed.; Tomo 5, Vol. 5).
- Juan Gabriel Naranjo González. (2019). Impacto en la adición de tereftalato de polietileno (PET) en mezclas asfálticas finas (FAM). In Impacto de la adición de tereftalato de polietileno (PET) en mezclas asfálticas finas (FAM). Universidad de los Andes.
- Kabir Oyeyi, Al-Bayati, H., & Pickel, D. , & T. S. (2023). Porous Rubber Pavement—In Situ Performance Evaluation of Stiffness and Friction in Canada. *Lecture Notes in Civil Engineering*, . 95–105.
- Lina Reyes, Daniela Sierra, & Javier Becerra. (2020). Aplicación de caucho reciclado para uso en pavimento rígido, revisión, análisis y perspectivas de investigación. *Investigación e Innovación En Ingenierías* , 3.
- Machin, E. B., Pedroso, D. T., & de Carvalho, J. A. (2017). Technical assessment of discarded tires gasification as alternative technology for electricity generation. *Waste Management*, 68, 412–420. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.004>
- MS-22 principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (22nd ed.). (1992).
- Pineda-Flores, G., & María Mesta-Howard, A. (n.d.). Petroleum asphaltenes: generated problematic and possible biodegradation mechanisms. In *Revista Latinoamericana de MICROBIOLOGÍA MICROBIOLOGÍA* (Vol. 43, Issue 3).
- Reciclaje de neumáticos. (2019, May).
- Red Nacional de Caminos. (2023). INEGI. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=794551067307,asícomo>
- Retama Velasco, J., & Heras Cruz, R. (2022). Evaluación experimental de la resistencia del concreto modificado con caucho. *RDP Revista Digital de Posgrado*, 6, 8–21. <https://doi.org/10.22201/fesa.rdp.2023.6.50>
- Rodríguez L., & Olán-Acosta, M. A. (2022). FEASIBILITY ASSESSMENT OF A HOT MIX ASPHALT PLANT MODIFIED WITH RECYCLED PET. *JEEOS*, 6, 41–56. <https://doi.org/10.19136/Jeeos.a6n2.5147>
- Rosas Baños, M., & Gámez Anaya, A. L. (2019). Prevención de la generación de residuos en el marco de una economía ecológica y solidaria: un análisis del manejo de residuos en los municipios de México. *Sociedad y Ambiente*, 21, 7–31. <https://doi.org/10.31840/sya.v0i21.2036>
- Salazar P. S. (2019). Incorporación de Caucho Reciclado en las Mezclas Asfálticas para Mejorar Pavimentos Flexibles en la Ciudad de Lima, Perú . 26–32.
- SCT. (2017). N-CMT-4-04-01.

“Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga”

Secretaría de Urbanismo y medio ambiente. (2008). Programa estatal para la prevención y gestión integral de los residuos en Michoacán de Ocampo.

Soares, G. P. (2002). A semear horizontes: leituras literárias na formação da infância, Argentina e Brasil (1915-1954). [Universidade de São Paulo]. <https://doi.org/10.11606/T.8.2002.tde-06062003-191230>

Tires. (2013). Neumático acero alambre.

Xavier Elías. (2012). Tratamiento y valorización energética de residuos (1st, Ed.; Díaz de Santos).

Xavier Elías Castell y Enric Velo. (2012). Tratamiento y valorización energética de residuos (Díaz de Santos, Ed.).

Yandri Maldonado. (2021). Asfalto: Tipos, Propiedades, Componentes y usos.

Shannit Haiatt Silva Torres Silva Torres

Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resist

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:405884364

Fecha de entrega

15 nov 2024, 2:27 p.m. GMT-6

Fecha de descarga

15 nov 2024, 2:31 p.m. GMT-6

Nombre de archivo

Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de res....pdf

Tamaño de archivo

2.8 MB

105 Páginas

28,184 Palabras

146,885 Caracteres

30% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Fuentes principales

- 30%  Fuentes de Internet
- 5%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Texto oculto**
15 caracteres sospechosos en N.º de página
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestría en ciencias de la ingeniería ambiental	
Título del trabajo	Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Shannit Haiatt Silva Torres	0520521x@umich.mx
Director	Dr. Hugo Luis Chavez Garcia	luis.chavez@umich.mx
Codirector	Dra. Elia Mercedes Alonso Guzman	elia.alonso@umich.mx
Coordinador del programa	Dr. Hugo Luis Chávez García	luis.chavez@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	no	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	NO	
Traducción a otra lengua	NO	
Revisión y corrección de estilo	NO	
Análisis de datos	NO	
Búsqueda y organización de información	NO	
Formateo de las referencias bibliográficas	NO	
Generación de contenido multimedia	NO	
Otro	NO	

Datos del solicitante

Nombre y firma

Shanni Silva Torres

Lugar y fecha

Morelia, Michoacán a 14 de Noviembre del 2024