

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

Desarrollo de una tecnología para la fabricación de adoquines con base a material reciclado.

**TESIS PROFESIONAL PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**

**PRESENTA:
M.I. JESÚS AGÜERO LÓPEZ**

DIRECTOR: DR. PEDRO ANTONIO MÁRQUEZ AGUILAR

**SINODALES: DR. ARTURO MOLINA OCAMPO, DRA. ABIGAIL PARRA PARRA,
DRA. MARY CRUZ RESÉNDIZ GONZÁLEZ, DRA. HEIDY GÓMEZ BARRANCO,
DR. JAIME ANDRÉS QUIROA HERRERA, DRA. VERÓNICA GONZÁLEZ MOLINA.**

CUERNAVACA, MORELOS

FEBRERO, 2025

Resumen.

El proceso del desarrollo tecnológico para la elaboración y fabricación de adoquines y ladrillos se realizó utilizando mezclas de materiales de desperdicios inorgánicos como el tereftalato de polietileno ($C_{10}H_8O_4$)_n adicionándole basalto que es una roca ígnea extrusiva que contiene hierro y magnesio con una composición química de variable porcentaje en masa de óxidos ($SiO_2 + TiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + FeO + MnO + MgO + CaO + Na_2O + K_2O + P_2O_5$); fosfoyeso que es un yeso subproducto de la producción de fertilizantes minerales que contienen fósforo y ácido fosfórico, los residuos de yeso son representados por ($CaSO_4 \cdot 0.5H_2O$) y material producto del fresado de carpeta asfáltica “MFCA” y que por lo general, está compuesto por un 93 a 97 % de agregado pétreo y por un 3 a 7 % de asfalto en condiciones iniciales de fabricación de carpetas asfálticas, el asfalto contiene cadenas de moléculas compuestas por azufre, calcio, carbono, hidrógeno, hierro, magnesio, nitrógeno, níquel, oxígeno, y complejos de vanadio. El agregado pétreo empleado por lo general es una roca ígnea como el basalto, andesita, granito y riolita. Empleando una metodología similar al termoconformado utilizando moldes de acero y sometiendo las mezclas propuestas a temperaturas entre 260 a 280 °C en tiempo de 2 hr, se obtienen muestras con dimensiones de adoquín y ladrillo que posteriormente, fueron ensayadas para obtener sus propiedades físicas tales como resistencia a compresión, flexión, deformación (solo mezcla PET-Basalto), absorción, dilatometría y adherencia con mezcla de mortero a base de cemento-arena sílica-agua. El valor máximo de la resistencia a la compresión es de 18 MPa, la resistencia a la flexión es de 3.3 MPa. Las muestras tienen baja absorción de agua ($\leq 1.4\%$) y bajo desgaste a la deformación (< 2 mm), buena adherencia y sin cambios volumétricos por dilatometría.

Abstract.

The process of technological development for the elaboration and manufacture of paving stones and bricks was carried out using mixtures of inorganic waste materials such as polyethylene terephthalate ($C_{10}H_8O_4$)_n adding basalt, which is an extrusive igneous rock containing iron and magnesium with a chemical composition of variable percentage by mass of oxides ($SiO_2 + TiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + FeO + MnO + MgO + CaO + Na_2O + K_2O + P_2O_5$); phosphogypsum which is a gypsum by-product of the production of mineral fertilizers containing phosphorus and phosphoric acid, gypsum residues are represented by ($CaSO_4 \cdot 0.5H_2O$) and material product of the milling of asphalt carpet "MMAC" and which is generally composed of 93 to 97% stone aggregate and 3 to 7% asphalt in initial conditions of manufacture of asphalt folders, asphalt contains chains of molecules composed of sulfur, calcium, carbon, hydrogen, iron, magnesium, nitrogen, nickel, oxygen, and vanadium complexes. The stone aggregate used is usually igneous rock such as basalt, andesite, granite and rhyolite. Using a methodology similar to thermoforming, using steel molds and subjecting the proposed mixtures to temperatures between 260 and 280 °C in a time of 2 hr, samples with dimensions of cobblestone and brick are obtained that were later tested to obtain their physical properties such as compressive strength, flexural, deformation (only PET-Basalt mixture), absorption, dilatometry and adhesion with cement-silica-water-based mortar mixture. The maximum value of the compressive strength is 18 MPa, the flexural strength is 3.3 MPa. The samples have low water absorption ($\leq 1.4\%$) and low deformation wear (< 2 mm), good adhesion and no volumetric changes by dilatometry.

Agradecimientos.

Externo mi agradecimiento al Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas del Instituto de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos por haberme permitido formarme en estas instalaciones.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología y a la Universidad Autónoma de Guerrero por la Beca Otorgada.

A la Dra. Marina Vlasova por aceptarme como su estudiante doctorante, así como enseñarme humildemente el arte de la investigación científica en el área de la tecnología de los materiales en la industria de la construcción. Al Dr. Pedro Antonio Márquez Aguilar por ser mi director de Tesis brindándome su conocimiento para poder realizar la investigación realizada. A mis sinodales conformados por el Dr. Arturo Molina Ocampo, la Dra. Abigail Parra Parra, la Dra. Maricruz Reséndiz González, la Dra. Heidy Gómez Barranco, el Dr. Jaime Andrés Quiroa Herrera y la Dra. Verónica González Molina, por su tiempo y asesoría en el momento que les solicité su apoyo.

A mis catedráticos de la Universidad Autónoma de Chihuahua, en especial a los Maestros en Ingeniería Arturo Alejo Tepate, José Elías Villa Pérez y Jimmy Azarías D'zul Góngora. A mis catedráticos del Instituto Tecnológico de Zacatepec, en especial a los Ingenieros Bernardo Gamboa Jiménez[†], Salvador Flores Hernández[†], Serafín Adame Pérez y Manuel Brito Gaytán. A mis amigos M.I. Ricardo Colunga Rodríguez, Ing. Joaquín Arellano Casanova, Ing. José Luís Rocher Pérez y Dr. Rafael Morales y Monroy que me apoyaron y me orientaron en mi vida profesionalista.

Dedicatorias.

Esta tesis se la dedico a Dios Padre, Dios Hijo y Dios Espíritu Santo, ya que siempre están acompañándome a mi lado.

A mi esposa Roxana Andrea[†], por apoyarme siempre y en todo momento, por esforzarse siempre en ser una excelente madre para mis hijos, por haber sido mi mejor amiga y mi adorada amada esposa, que hoy en día, sé que a mí y a mis hijos, nos guías y nos proteges desde el cielo.

A mis queridos Hijos Diana, André, Ramses y Zinedine, quienes siempre han sido mi alegría y mi motor para seguir adelante.

A mi abuela Remedios Romano Cortés[†], que siempre me apoyo, me aconsejo en todo momento y me decía en mi infancia *“Se más competente que todos ellos, gánales”*.

A mis tíos Ricardo y Román Habacuc[†] y mis tías Guadalupe y Cecilia por el cariño y afecto que me han tenido desde siempre aun a pesar de la distancia y su apoyo en el momento que se los he solicitado y por sus consejos que me han servido de mucho ejemplo para ser un mejor hombre y seguir adelante.

A mis Hermanos[†] que están con Dios.

A mi querido Jago[†] y mi cariñosa Sky[†]

Índice.

Resumen.....	i
Abstract.....	ii
Agradecimientos.....	iii
Dedicatorias.....	iv
Capítulo 1. Antecedentes.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Antecedentes.....	2
1.3. Justificación.....	8
1.4. Hipótesis.....	9
1.5. Objetivos.....	9
1.6. Alcance.....	10
Capítulo 2. Marco teórico.....	11
2.1. Conceptos de materiales.....	11
2.2. Propiedades físicas de los materiales.....	14
2.2.1. Adoquín.....	14
2.2.2. Ladrillo.....	14
2.2.3. Tereftalato de Polietileno (PET).....	15
2.2.4. Basalto.....	17
2.2.5. Fosfoyeso.....	19
2.2.6. Material de Fresado de Carpeta Asfáltica.....	21
2.2.7. Morteros.....	23
2.3. Características y propiedades de los adoquines y ladrillos fabricados con materiales reciclados.....	23
2.4. Evaluación de la resistencia mecánica, durabilidad y otras propiedades relevantes de los adoquines y ladrillos.....	25

2.5. Proceso tecnológico para la obtención de piezas de materiales compuestos.....	27
2.5.1. Proceso de adquisición de los materiales iniciales.....	29
2.5.2. Proceso de molienda de los materiales iniciales.....	31
2.5.3. Proceso de tamizado de materiales iniciales.....	34
2.5.4. Proceso de homogenización de los materiales iniciales.....	36
2.5.5. Proceso de sinterización para la obtención del material compuesto.....	38
2.6. Resistencia a la compresión en materiales compuestos.....	39
2.7. Resistencia a la flexión en materiales compuestos.....	41
2.8. Proceso tribológico para obtener la deformación de una pieza de material compuesto.....	43
2.9. Absorción en materiales compuestos.....	46
2.10. Proceso de dilatación térmica en materiales compuestos.....	48
 Capítulo 3. Desarrollo experimental.....	51
3.1. Residuos de plástico PET.....	52
3.2. Roca basalto.....	52
3.3. Fosfoyeso.....	53
3.4. Material de fresado de carpeta asfáltica.....	53
3.5. Proceso de molienda de residuos de plástico PET.....	54
3.6. Proceso de molienda de roca basalto.....	55
3.7. Proceso de molienda de fosfoyeso.....	55
3.8. Proceso de molienda de material de fresado de carpeta asfáltica.....	55
3.9. Proceso de tamizado de residuos de plástico PET.....	56
3.10. Proceso de tamizado de roca basalto.....	56
3.11. Proceso de tamizado de fosfoyeso.....	57
3.12. Proceso de tamizado de material de fresado de carpeta asfáltica.....	57
3.13. Homogenización de mezclas PET-Basalto, colocación en molde; fundición y corte de la muestra, utilizando tamaño de partículas del agregado que pasan por la malla de abertura de 1.41 mm y retenido en 0.595 mm.....	57

3.14. Homogenización de mezclas PET-Fosfoyeso, colocación en molde; fundición y corte de la muestra, utilizando tamaño de partículas del agregado de 0.25 mm.....	59
3.15. Homogenización de mezclas PET-MFCA, colocación en molde; fundición y corte de la muestra, utilizando tamaño de partículas del agregado que pasan por la malla de abertura de 9.53 mm y retenido en 0.595 mm.....	61
3.16. Procedimiento para ejecutar las pruebas de resistencia a compresión de mezclas PET-Basalto, mezclas PET-Fosfoyeso y mezclas PET-MFCA.....	63
3.17. Procedimiento para ejecutar las pruebas de resistencia a flexión de mezclas PET-Basalto, mezclas PET-Fosfoyeso y mezclas PET-MFCA.....	64
3.18. Procedimiento para ejecutar la prueba de deformación permanente por rodadura con rueda cargada de Hamburgo para los adoquines de mezclas PET-Basalto.....	66
3.19. Procedimiento para realizar la prueba de absorción de mezclas PET-Basalto, mezclas PET-Fosfoyeso y mezclas PET-MFCA.....	67
3.20. Procedimiento para realizar la prueba de dilatometría en mezclas PET-Basalto, mezclas PET-Fosfoyeso y mezclas PET-MFCA.....	68
3.21. Procedimiento para elaborar mezcla de adherencia para los adoquines de composición PET – Basalto a base de Cemento – Arena Silica – Agua.....	70
3.22. Procedimiento para realizar la prueba de absorción en mezcla de adherencia para los adoquines de composición PET – Basalto a base de Cemento – Arena Silica – Agua.....	70
Capítulo 4. Resultados y discusión.....	72
4.1. Contracción lineal en mezclas PET-Basalto, mezclas PET-Fosfoyeso y mezclas PET – MFCA.....	72
4.2. Resistencia a la compresión en mezclas PET-Basalto, mezclas PET-Fosfoyeso y mezclas PET – MFCA.....	74
4.3. Resistencia a la flexión en mezclas PET-Basalto, mezclas PET-Fosfoyeso y mezclas PET – MFCA.....	77

4.4. Deformación por rodadura en mezclas PET-Basalto.....	79
4.5. Absorción en mezclas PET-Basalto, mezclas PET-Fosfoyeso y mezclas PET – MFCA.....	80
4.6. Dilatometría en mezclas PET-Basalto, mezclas PET-Fosfoyeso y mezclas PET – MFCA.....	83
4.7. Adherencia de mezcla a base de Cemento – Arena Silica – Agua.....	84
4.8. Absorción en mezcla de adherencia a base de Cemento – Arena Silica – Agua.....	84
Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones.....	86
Referencias.....	89
Anexo 1.....	98

Lista de tablas.

Capítulo 2. Marco teórico.

Tabla II.I. Requisitos físicos del adoquín.....	14
Tabla II.II. Requisitos físicos del ladrillo macizo.....	15
Tabla II.III. Propiedades físicas del plástico PET.	17
Tabla II.IV. Propiedades físicas del basalto.	19
Tabla II.V. Clasificación de los morteros.....	23
Tabla II.VI. Propiedades físicas del mortero (adherencia).....	23

Lista de figuras.

Capítulo 2. Marco teórico.

Figura 2.1.- Adoquín.....	11
Figura 2.2.- Ladrillo.....	11
Figura 2.3.- Plástico PET (botella).....	12
Figura 2.4.- Basalto.....	12
Figura 2.5.- Fosfoyeso.....	13
Figura 2.6.- Fresado de carpeta asfáltica.....	13
Figura 2.7.- Mortero.....	14
Figura 2.8.- Esquema de prueba de resistencia a la compresión.....	41
Figura 2.9.- Esquema de prueba de resistencia a la flexión	43
Figura 2.10.- Esquema de prueba de deformación.	46

Capítulo 3. Desarrollo experimental.

Figura 3.1.- Proceso de fabricación para la obtención del material.....	51
Figura 3.2.- Plástico PET adquirido.....	52
Figura 3.3.- Planta de trituración.....	53
Figura 3.4.- Extracción de basalto.....	53

Figura 3.5.- Fosfoyeso.....	53
Figura 3.6.- Material de fresado de carpeta asfáltica.....	54
Figura 3.7.- Plástico PET triturado.....	54
Figura 3.8.- Trituradora de roca.....	56
Figura 3.9.- Maquina Ángeles.....	56
Figura 3.10.- Equipo Retsch PM400/2.....	56
Figura 3.11.- Muestras obtenidas con diferentes composiciones PET – Basalto, T = 280° C.....	59
Figura 3.12.- Muestras obtenidas con diferentes composiciones PET- Fosfoyeso, T = 280° C.....	61
Figura 3.13.- Muestras obtenidas con diferentes composiciones PET-MFCA, T = 280° C.....	63
Figura 3.14.- Muestra colocada en prensa universal previa a ser sometida a esfuerzos.....	64
Figura 3.15.- Prueba de flexión en adoquín.....	65
Figura 3.16.- Prueba de deformación permanente por rodera en adoquines.....	67
Figura 3.17.- Prueba de absorción en adoquín.....	68
Figura 3.18.- Prueba de dilatometría en adoquín.....	69
Figura 3.19.- Mezcla a base de Cemento – Arena Silica – Agua para adherencia en adoquines.....	70
Figura 3.20.- Prueba de absorción en mezcla de adherencia.....	71

Capítulo 4. Resultados y discusión.

Figura 4.1.- Cambio en la contracción de las muestras según la composición de las mezclas de PET - Basalto.....	72
Figura 4.2.- Cambio en la contracción de las muestras según la composición de las mezclas de PET - Fosfoyeso.....	73
Figura 4.3.- Cambio en la contracción de las muestras según la composición de las mezclas de PET - MFCA.....	74

Figura 4.4.- Compresión de las muestras según la composición de las mezclas de PET - Basalto.....	75
Figura 4.5.- Compresión de las muestras según la composición de las mezclas de PET - Fosfoyeso.....	76
Figura 4.6.- Compresión de las muestras según la composición de las mezclas de PET - MFCA.....	76
Figura 4.7.- Flexión de las muestras según la composición de las mezclas de PET - Basalto.....	78
Figura 4.8.- Flexión de las muestras según la composición de las mezclas de PET - Fosfoyeso.....	78
Figura 4.9.- Flexión de las muestras según la composición de las mezclas de PET - MFCA.....	79
Figura 4.10.- Deformación de las muestras según la composición de las mezclas de PET - Basalto.....	80
Figura 4.11.- Absorción de las muestras según la composición de las mezclas de PET - Basalto.....	81
Figura 4.12.- Absorción de las muestras según la composición de las mezclas de PET - Fosfoyeso.....	82
Figura 4.13.- Absorción de las muestras según la composición de las mezclas de PET - MFCA.....	83
Figura 4.14.- Adherencia de la mezcla a base de Cemento – Arena Silica – Agua.....	84
Figura 4.15.- Absorción de las muestras según la composición de la mezcla de Cemento-Arena Silica-Agua.....	85

Capítulo 1. Antecedentes.

1.1. Introducción.

En el país y en el mundo, a través del paso del tiempo y la evolución de la humanidad, se vio en la necesidad de mejorar los sistemas de comercio y de comunicación de un punto a otro, es decir, trasladarse de un lugar a otro, con el fin de mejorar su calidad de vida ya sea por las razones educativas o mercantiles, y que, a su vez, por razones de distracción personal, con fines de diversión y relajación que hoy en día es el ámbito turístico. En la actualidad existes maneras de comunicarse por las vías terrestres a través de caminos por mencionar algunas; en nuestro país se cuenta con un Red Nacional de Caminos con un total de 788,323 km; de los cuales 528,596 km son caminos no pavimentados y 21,731 km son de veredas [1].

Por lo que equivale a un 70.38% que no cuenta en su superficie de rodamiento con una estructura de pavimento, que brinde las necesidades de traslado con seguridad y confort a los usuarios de estos caminos, así mismo, no se pueden brindar los servicios más esenciales para el desarrollo de un país que es la comunicación, educación y comercio.

Los caminos están clasificados estructuralmente como pavimentos flexibles y rígidos. Los pavimentos flexibles constan con un proceso de fabricación en el cual, utilizan materiales pétreos de origen volcánico (rocas) los cuales son basalto, riolita, andesita y granito, combinado con una mezcla bituminosa derivada del petróleo y fabricado por un proceso térmico a una temperatura de 180°C en una maquina llamada planta de asfalto. Los pavimentos rígidos son fabricados con dos diferentes tipos de metodologías que están en función de sus materiales para su estructura de la superficie de rodamiento; el primero consta de una mezcla a base de concreto hidráulico, la cual, está conformada

con una mezcla de grava-cemento-agua, con dosificaciones de acuerdo al valor de resistencia deseada en el proyecto, utilizando varios equipos para su elaboración ya sean plantas de concreto hidráulico y/o revolvedoras de concreto a temperatura ambiente, ambas de diferentes capacidades de fabricación; el segundo consta de una mezcla de agregados-cemento-agua, los agregados pueden ser de gravas y arenas, mezclando los materiales y vertiéndolos en moldes metálicos de formas rectangulares, cuadradas y poligonales con dimensiones de acuerdo a especificaciones de construcción.

La presente investigación es el complemento de un proyecto por consumir, el cual consiste en analizar, varias alternativas de diseño de mezclas utilizando material pétreo como es la roca basáltica, material de desperdicio de fertilizante como lo es el fosfoyeso, el material producto del fresado de carpeta asfáltica o nombrado también como reciclado de carpeta asfáltica, cada uno de ellos combinado junto con partículas trituradas obtenidas de los envases plastificados con base a tereftalato de polietileno “PET”, con el propósito de utilizarlo como un material que forme parte de un sistema constructivo en las superficies de rodamiento de los caminos.

1.2. Antecedentes.

La industria de la construcción ha experimentado una evolución significativa en las últimas décadas, impulsada en gran medida por avances tecnológicos que han transformado los procesos de producción y los materiales utilizados en el sector. En este contexto, el desarrollo tecnológico en la elaboración de adoquines y ladrillos se presenta como un área de estudio crucial que busca mejorar la eficiencia, la sostenibilidad y la calidad de los productos utilizados en la construcción de infraestructuras urbanas y residenciales.

La construcción tradicionalmente ha dependido de materiales como el concreto y el ladrillo cerámico, cuya producción conlleva un alto consumo de energía y recursos naturales, así como la generación de grandes cantidades de residuos. Sin embargo, el avance tecnológico ha permitido la exploración de alternativas más sustentables, como el uso de materiales reciclados y la aplicación de procesos de fabricación más eficientes y menos contaminantes.

En este sentido, la elaboración de adoquines y ladrillos con materiales reciclados se presenta como una solución innovadora que combina la reutilización de desechos industriales con tecnologías de producción avanzadas. Autores como (López et al., 2020) [2] destacan que esta práctica no solo contribuye a reducir la cantidad de residuos enviados a vertederos, sino que también permite la obtención de productos de alta calidad con propiedades físicas y mecánicas adecuadas para su uso en la construcción de pavimentos y muros.

El moldeo es la etapa importante del proceso de fabricación de adoquines y ladrillos, donde las mezclas preparadas se vierten en moldes específicos para darle forma. Esta fase requiere maquinaria especializada y mano de obra calificada, y puede ser una fuente de desafíos en términos de calidad y uniformidad de los productos finales (Vázquez et al., 2019) [3].

Finalmente, los adoquines y ladrillos moldeados se someten a un proceso de cocción en hornos industriales a altas temperaturas. Este paso es crítico para garantizar la resistencia y durabilidad de los productos, pero también es una de las etapas más energéticamente intensivas y contaminantes del proceso de fabricación (Rodríguez et al., 2021) [4].

El uso de materiales de desperdicios inorgánicos en la fabricación de adoquines y ladrillos representa una innovadora y prometedora alternativa que

busca abordar los desafíos asociados con la extracción de materias primas y la generación de residuos en la industria de la construcción.

En 1967 Nathaniel Wyeth se unió a DuPont como ingeniero de campo, se preguntó si la gaseosa podía almacenarse en botellas de plástico. Después de experimentar con una botella de detergente de plástico que resultó ser incapaz de resistir las fuerzas de los líquidos presurizados, se dio cuenta de que se necesitaría un material mucho más resistente. Se decidió por el tereftalato de polietileno como material y recibió una patente en 1973. Coca-cola® presentó la primera botella de PET de un solo uso en 1978 [5]. El tereftalato de polietileno (PET), conocido comúnmente como plástico PET, es un material ampliamente utilizado en envases de bebidas y otros productos de consumo. Sin embargo, una vez que estos envases son desechados, el PET puede convertirse en un residuo ambientalmente problemático debido a su lenta degradación. La incorporación de PET reciclado en la fabricación de adoquines y ladrillos no solo ofrece una salida para este material de desperdicio, sino que también puede mejorar algunas propiedades de los productos finales, como la resistencia a la compresión y la absorción de agua (González et al., 2020) [6].

El basalto, una roca ígnea extrusiva que contiene hierro y magnesio, se utiliza comúnmente como agregado en la industria de la construcción. Al incorporar basalto triturado en la fabricación de adoquines y ladrillos, se pueden mejorar las propiedades mecánicas de los productos finales, así como su resistencia al desgaste y la abrasión (López et al., 2021) [7]. Además, el uso de basalto reciclado contribuye a reducir la dependencia de la extracción de recursos naturales y disminuir el impacto ambiental asociado con esta actividad.

El fosfoyeso, un subproducto de la producción de fertilizantes minerales que contienen fósforo y ácido fosfórico, también se ha explorado como un material viable para la fabricación de adoquines y ladrillos. Aunque el fosfoyeso

tradicionalmente se considera un residuo industrial problemático debido a su contenido de sulfato y metales pesados, su reutilización en la construcción puede mitigar los impactos ambientales negativos asociados con su disposición y almacenamiento. Sin embargo, es importante realizar estudios exhaustivos para garantizar que el uso de fosfoyeso reciclado en la fabricación de materiales de construcción cumpla con los estándares de calidad y seguridad establecidos (Martínez et al., 2019) [8].

El material de fresado de carpeta asfáltica es el producto obtenido de los trabajos utilizando una maquina fresadora para eliminar las deformaciones superficiales en carpetas asfálticas o para retirar capas de rodadura o capas asfálticas del pavimento deterioradas. Este material que ha sufrido el daño por esfuerzos dinámicos de los vehículos, por lo general, se descarta para su reúso en la fabricación de otro sistema estructural en vialidades, lo que genera su almacenamiento en bancos de desperdicios y una creciente contaminación para el medio ambiente.

Recientes investigaciones utilizando la combinación de residuos de plástico PET con otros materiales utilizados para la industria de la construcción obtuvieron resultados que a continuación son descritos:

En la investigación realizada por (Byung, W., et al., 2006) [9] nos indica que el concreto con resina basado en PET reciclado puede lograr una resistencia a la compresión de 73.7 MPa, una resistencia a la flexión de 22.4 MPa, resistencia a la tracción de 7.85 MPa, y módulo elástico de 27.9 GPa”.

En la investigación realizada por (Pastor C. A., et al., 2015) [10], los resultados de sus mezclas propuestas para adoquines de concreto con proporciones de 1 de cemento por 1.5 de arena y 0.5 de PET, de 100.63 Kg/cm², obtuvo valores de resistencias entre el 25% y 30% de acuerdo con su diseño.

En la investigación realizada por (Echeverria E.R., 2017) [11] su investigación indica que las propiedades físicas de los tres tipos de ladrillo propuestos para su fabricación de concreto - PET (3%, 6%, 9% PET) la absorción, aumentan a medida que se incluye el PET en la mezcla debido al tamaño de sus placas, con valores registrados entre 8.73% a 12.39%.

En la investigación realizada por (Akinwumi I.I. et. al., 2019) [12] nos indica que la resistencia mecánica a compresión de los ladrillos a base de arcilla y plásticos reciclado, con tamaño de partículas del PET < 6.3 mm obtuvieron los valores de resistencia a compresión simple de 0.45 MPa a 1.45 MPa y con tamaño de partículas del PET > 9.6 mm obtuvieron los valores de resistencia a compresión simple de 0.45 MPa a 1.3 MPa.

En la investigación realizada por (Aneke F.I. et. al., 2021) [13] nos indica que la resistencia mecánica a compresión de los ladrillos a base de arena de fundición y chatarra de plásticos (SPW, compuestos de hidrocarburos que contienen carbono, hidrógeno y oxígeno), en proporciones de chatarra de plásticos y arena de fundición (80% - 20%, 70% - 30% y 60% - 40%) obtuvieron los valores de resistencia a compresión simple de 33.25 MPa, 38.14 MPa y 29.45 MPa.

En la investigación realizada por (Ikechukwu A.F. et. al., 2021) [14] nos indica que la resistencia de los ladrillos producidos es de 33.02 MPa, 42.01MPa y 37.40 MPa para WMB 1, 2 y 3, donde WMB es la mezcla de vidrio triturado con chatarra de plásticos en proporciones de 80% - 20%, 70% - 30% y 60% - 40%.

En la investigación realizada por (Flores V. et. al., 2019) [15] nos indica que su estudio al evaluar el comportamiento de morteros mixtos fabricados a partir de

cemento y cal procedente del reciclado de PG obtuvieron unos valores de resistencia a la compresión simple de 9.7 MPa y 14.1 MPa.

En la investigación realizada por (Xuemei C. et. al., 2022) [16] nos indica que su estudio al evaluar las propiedades físicas de sus mezclas de hemihidrato fosfoyeso (HPG) por calcinación de 40 mm × 40 mm × 160 mm, obtuvieron unos valores de resistencia a la compresión simple de 20 MPa, 22.5 MPa y 24 MPa.

En la investigación realizada por (Colmillo D. et. al., 2023) [17] nos indica que su estudio al evaluar las propiedades físicas de sus mezclas de cemento compuestos a base de fosfoyeso calcinado, obtuvieron unos valores de resistencia a la compresión simple de 3 MPa a 6.5 MPa.

En la investigación realizada por (Murali G. et. al., 2023) [18] nos indica que su estudio al evaluar las propiedades físicas de sus mezclas de mortero compuestos a base de fosfoyeso, obtuvieron unos valores de resistencia a la compresión simple de 5 MPa a 20 MPa.

En la investigación realizada por (Sheng Z. et. al., 2018) [19] nos indica que su estudio al evaluar las propiedades físicas de sus baldosas cerámicas no cocidas a partir mezclas de sulfato de calcio y fosfoyeso, obtuvieron los valores de resistencia a la flexión de 18.5 MPa a 27.2 MPa.

En la investigación realizada por (Flores-Alés V. et. al., 2020) [20] nos indica que su estudio al evaluar las propiedades físicas de sus mezclas de morteros compuestos de Hidróxido de Sodio con Fosfoyeso más agua, obtuvieron unos valores de resistencia a la flexión de 0.4 MPa a 1 MPa con sulfatos y de 0.4 MPa a 0.5 MPa sin sulfatos.

En la investigación realizada por (Pereira V.M. et. al., 2021) [21] nos indica que su estudio al evaluar las propiedades físicas de sus mezclas de fosfoyeso reciclado, obtuvieron unos valores de resistencia a la flexión de 2.8 MPa y 4.1 MPa.

En la investigación realizada por (Chen X.M. et. al., 2022) [22] nos indica que su estudio al evaluar las propiedades físicas de sus mezclas de fosfoyeso β -hemihidrato, obtuvieron unos valores de resistencia a la flexión de 3.1 MPa, 3.3 MPa, 4.0 MPa, 4.4 MPa y 5.7 MPa.

En la investigación realizada por (Deng F. et. al., 2023) [23] nos indica que su estudio al evaluar las propiedades físicas de sus mezclas de cemento compuestos a base de yeso fosforado calcinado, obtuvieron unos valores de resistencia a la flexión de 3.2 MPa a 4.6 MPa.

1.3. Justificación.

La obtención de ladrillos y adoquines a base de materiales y residuos industriales de desperdicio (plástico PET, fosfoyeso, etc.) han sido muy analizados; en su mayoría son elaborados en mezclas en frío y/o en temperatura ambiente. En México se tiene un programa a nivel federal denominado: Programa Especial de los Pueblos Indígenas y Afromexicanos 2021- 2024, por parte del Instituto Nacional de los Pueblos Indígenas publicado en su Diario Oficial de la Federación con fecha 27 de diciembre de 2021; en el cual, los caminos son fabricados con materiales que se encuentran en la región y con la mano de obra local, teniendo una desventaja en el proceso constructivo, debido a que los materiales implementados en su mayoría no cumplen con los criterios mínimos de resistencia a los esfuerzos dinámicos que sufrirán en su proceso de vida útil por los vehículos que transitarán en la zona; por lo cual, este sistema y metodología de fabricación de adoquín y

ladrillo propuesto en este trabajo de investigación con mezclas de plástico PET y materiales como el basalto, fosfoyeso y material producto del fresado de carpetas asfálticas, pueden ser una alternativa viable para su uso y aplicación en la construcción de los caminos y demás obras complementarias que se requieran en el proyecto.

1.4. Hipótesis.

Se plantea llevar a cabo en este proyecto, la fabricación de adoquines y/o ladrillos, utilizando materiales tales como el plástico PET, que logren fusionarse con otros materiales de origen pétreo como son las rocas de basalto, materiales de desperdicios tales como el fosfoyeso y material de fresado de carpeta asfáltica “MFCA” garantizando resistencias y calidades óptimas para su uso y aplicación en la industria de la construcción.

1.5. Objetivos.

General.

Desarrollar una tecnología para la fabricación de adoquines con base a material reciclado; que pueda ser utilizado en la superficie de rodamiento de un camino, y su aplicación en materiales de construcción.

Específicos.

- Determinación de composiciones de PET - partículas basalto, PET - partículas de fosfoyeso y PET - partículas de material producto del fresado de carpeta asfáltica “MFCA”.
- Caracterización de propiedades mecánicas y térmicas.

- Desarrollo de una mezcla ligante para su adecuada adherencia y sujeción de los mismos.

1.6. Alcance.

El propósito de este trabajo es proporcionar la fabricación de adoquines y/o ladrillos con mezclas de materiales con proporción plástico PET (90 – 30) % en peso – Basalto (10 – 70) % en peso), plástico PET (90 – 40) % en peso – Fosfoyeso (10 – 60) % en peso y plástico PET (90 – 20) % en peso – Material de Fresado de Carpeta Asfáltica (10 – 80) % en peso, con las dimensiones estándares que se aplican en las áreas de trabajo propuestas en la industria de la construcción. Llevando a cabo inicialmente la adquisición de los materiales, posteriormente efectuar el proceso de trituración sea el caso o no con el objeto de tener las dimensiones de partículas propuestas, tamizado de las partículas obtenidas del proceso de trituración, mezclado de los materiales para obtener una buena homogenización y posterior a ello, realizar la colocación de las mezclas en moldes metálicos para darle forma y dimensión, llevar a cabo el proceso térmico utilizando horno y/o mufla a la temperatura propuesta para lograr su sinterización y/o fusión de las mezclas, enfriamiento en el tiempo propuesto, extracción de las piezas obtenidas del molde metálico y realizar su caracterización de sus propiedades mecánicas mediante pruebas de resistencias a compresión, flexión y deformación, absorción de agua y dilatación térmica. Elaboración de una mezcla ligante con el objeto de lograr la adherencia entre ambos adoquines y/o ladrillos fabricados, así como, la ejecución de prueba de absorción de la mezcla ligante.

Capítulo 2. Marco teórico.

2.1. Conceptos de materiales.

Adoquín: Piedra labrada en forma de prisma rectangular para empedrados y otros usos (ver figura 2.1).



Figura 2.1.- Adoquín.
Fuente: elaboración propia.

Ladrillo: Elemento de forma paralelepípeda ortogonal, sólidos o huecos, fabricados mediante el moldeo, extrusión o compresión, secado y cocción de arcilla. Se usan en la construcción de muros de carga (ver figura 2.2) [24].



Figura 2.2.- Ladrillo.
Fuente: elaboración propia.

Plástico PET: El plástico Pet, o polietileno tereftalato-poliéster, es un polímero plástico que se obtiene a partir del etileno y el paraxileno. Es un material lineal, con una gran transparencia y dureza, muy resistente, tanto al desgaste y a los productos químicos, como al impacto, a la rotura y al fuego (ver figura 2.3) [25].

El tereftalato de polietileno (PET) presenta su punto de fusión entre los 240°C y 260° C, así como una densidad relativa de 1.35 g/cm³. El valor del polvo fino es de 3 mg/m³ y para polvo grueso es 10 mg/m³ [26].



Figura 2.3.- Plástico PET (botella).
Fuente: elaboración propia.

Basalto: Es una roca volcánica, por lo común de color negro o verdoso, de grano fino, muy dura, compuesta principalmente de feldespato y piroxena o augita, y a veces de estructura prismática [27] (*ver figura 2.4*).

Forma parte de las rocas ígneas comunes (extrusivas lavas) afanítica de un color gris o negro, en su mayoría no son porfíricos, pero algunos contienen fenocristales de plagioclasa y olivino. El basalto es muy abundante en el país de México, especialmente en el valle de la Ciudad de México y sus alrededores (eje volcánico) [28].



Figura 2.4.- Basalto.
Fuente: elaboración propia.

Fosfoyeso: Es un subproducto de la producción de fertilizantes minerales que contienen fósforo y ácido fosfórico [29]. (Ver figura 2.5).



Figura 2.5.- Fosfoyeso.
Fuente: elaboración propia.

Fresado de carpeta asfáltica: Es el conjunto de actividades que se realizan con una maquina fresadora para eliminar las deformaciones superficiales en carpetas asfálticas o para retirar capas de rodadura o capas asfálticas del pavimento deterioradas, a fin de mejorar las características de comodidad y fricción de la superficie de rodadura o para desplantar parcial o totalmente la nueva capa de rodadura la profundidad, ancho y sección requeridos en el sitio [30]. (Ver figura 2.6).



Figura 2.6.- Fresado de carpeta asfáltica.
Fuente: elaboración propia.

Mortero: Es una masa constituida a base de arena, conglomerante y agua, pudiendo adicionarle un aditivo [31]. (Ver figura 2.7).



Figura 2.7.- Mortero.
Fuente: elaboración propia.

2.2. Propiedades físicas de los materiales.

2.2.1. Adoquín.

En la tabla II.I. se indican los requisitos físicos del adoquín.

Tabla II.I. Requisitos físicos del adoquín.

Tipo	Espesor mínimo (cm)	Absorción de agua (24h) (%)	Resistencia a la compresión (Kgf/cm ²)	Aplicación
A	4 a 6	8	250	Andadores, plazuelas, banquetas y cocheras.
B	8	8	250	Tránsito ligero en zonas residenciales.
C	8	8	300	Tránsito medio en calles y estacionamientos de servicio.
D	8 ó más	8	350	Tránsito pesado.

Fuente: (ONNCCE, 2014) [32]

2.2.2. Ladrillo.

En la tabla II.II. se indican los requisitos físicos del ladrillo macizo.

Tabla II.II. Requisitos físicos del ladrillo macizo.

Tipo	Adherencia (Mpa)	Absorción de agua (24h) (%)	Resistencia a la compresión (Mpa)
A	0.4	12	20
B	0.3	16	12
C	0.2	18	8
D	0.17	20	4

Fuente: (N-CMT-2-01-001/02, 2002) [24]

2.2.3. Tereftalato de Polietileno (PET).

El Tereftalato de Polietileno (PET) es un polímero termoplástico ampliamente utilizado en la industria del envasado de alimentos y bebidas, así como en la fabricación de textiles y otros productos de consumo. Sin embargo, su potencial como material de construcción ha sido objeto de interés creciente debido a sus diversas características y propiedades, que lo hacen adecuado para una variedad de aplicaciones en el sector de la construcción. A continuación, se describen algunas de las características y propiedades del PET, así como su potencial como material de construcción:

Durabilidad: El PET es un material duradero que puede soportar condiciones ambientales adversas, como la exposición a la luz solar, la humedad y los cambios de temperatura, sin experimentar degradación significativa. Esta durabilidad lo hace adecuado para aplicaciones en exteriores, como revestimientos de fachadas y cubiertas (Rodríguez et al., 2021) [33].

Ligereza: El PET es un material ligero en comparación con otros materiales de construcción tradicionales, como el concreto y el acero. Esta característica facilita su manipulación, transporte e instalación, lo que puede resultar en ahorros significativos en costos y tiempo de construcción (López et al., 2020) [34].

Resistencia mecánica: A pesar de su peso ligero, el PET exhibe una notable resistencia mecánica, lo que lo hace adecuado para aplicaciones estructurales en la construcción, como paneles de refuerzo y elementos de soporte. Su resistencia a la tracción y flexión lo convierte en un material versátil y confiable para diversas aplicaciones (García et al., 2019) [35].

Resistencia a la corrosión: El PET es resistente a la corrosión y la oxidación, lo que lo hace adecuado para su uso en ambientes marinos y áreas sujetas a condiciones climáticas extremas. Su resistencia a la corrosión lo convierte en una alternativa viable a materiales metálicos en aplicaciones expuestas a la intemperie (Martínez et al., 2022) [36].

Reciclabilidad: Una de las principales ventajas del PET como material de construcción es su capacidad para ser reciclado y reutilizado. El PET reciclado puede ser utilizado en la fabricación de nuevos productos, lo que contribuye a cerrar el ciclo de vida del material y reducir el impacto ambiental asociado con su producción y disposición (Pérez et al., 2018) [37].

El potencial del Tereftalato de Polietileno (PET) como material de construcción radica en su combinación única de características y propiedades, que lo hacen adecuado para una variedad de aplicaciones en el sector de la construcción. Su durabilidad, ligereza, resistencia mecánica, resistencia a la corrosión y reciclabilidad lo convierten en una alternativa atractiva a los materiales de construcción convencionales, especialmente en proyectos que buscan mejorar la sostenibilidad y reducir el impacto ambiental.

En la tabla II.III. se indican las propiedades físicas del tereftalato de polietileno (PET).

Tabla II.III. Propiedades físicas del plástico PET.

Propiedad	Valor	Unidad
Resistencia a la compresión	76 – 128	Mpa
Resistencia a la tensión	59 – 72	Mpa
Resistencia al impacto	0.01 – 0.04	J/mm
Dureza	M94 – M101	Rockwell
Dilatación Térmica	15.2 – 24 * 10 – 4	°C
Resistencia al calor	80-120	°C
Resistencia dieléctrica	13,780 – 15,750	V/mm
Constante dieléctrica (60 Hz)	3.65	
Absorción de agua (24h)	0.02	%
Velocidad de combustión	Consumo lento	mm/min
Efecto luz solar	Se decolora ligeramente	
Calidad de mecanizado	Excelente	
Calidad óptima	Transparente a opaco	
Módulo de Young ϵ	2800 – 3100	Mpa
Límite elástico	50 – 150	%
Punto de fractura y ruptura	14.89	N/m ²
Temperatura de transición vítrea	75	°C
Vicat B	170	°C
Conductividad térmica	0.24	W/(m.k)
Coeficiente de dilatación lineal	7 x 10 ⁻⁵	K
Calor específico	1	KJ/(Kg.k)
Índice de refracción	15,750	

Fuente: (Richardson et al., 2000) [38], (Van Der Vegt et al., 2003) [39]

2.2.4. Basalto.

El basalto es una roca ígnea extrusiva de origen volcánico que se caracteriza por su composición química y propiedades físicas únicas que lo hacen adecuado para diversas aplicaciones en la construcción, incluida la fabricación de adoquines y ladrillos. A continuación, se describen la composición química y algunas propiedades relevantes del basalto para su uso en esta industria:

Composición química: El basalto está compuesto principalmente por minerales como feldespato, plagioclasa, piroxeno y olivino, así como por cantidades variables de minerales accesorios como óxidos de hierro, titanio y magnesio. La composición química del basalto puede variar según su origen geográfico y la historia geológica del área de donde se extrajo, pero típicamente contiene altos porcentajes de sílice (SiO₂) y otros óxidos como alúmina (Al₂O₃), hierro

(FeO/Fe₂O₃), calcio (CaO), magnesio (MgO) y potasio (K₂O) (García et al., 2021) [40].

Resistencia mecánica: El basalto exhibe una excelente resistencia mecánica, lo que lo hace adecuado para aplicaciones en la construcción que requieren materiales duraderos y resistentes al desgaste. La alta resistencia a la compresión y la flexión del basalto lo convierte en un material ideal para adoquines y ladrillos utilizados en pavimentación y revestimiento de superficies (López et al., 2022) [41].

Resistencia al desgaste y la abrasión: Debido a su estructura mineralógica y composición química, el basalto es altamente resistente al desgaste y la abrasión. Esta propiedad lo hace especialmente adecuado para su uso en aplicaciones de pavimentación donde se requiere una superficie resistente y duradera que pueda soportar el tráfico vehicular y peatonal continuo (Martínez et al., 2020) [42].

Estabilidad dimensional: El basalto exhibe una excelente estabilidad dimensional, lo que significa que es poco propenso a expandirse o contraerse debido a cambios en la temperatura y la humedad. Esta propiedad es importante en aplicaciones de construcción donde se requiere que los materiales mantengan su forma y tamaño original a lo largo del tiempo (Pérez et al., 2019) [43].

Baja absorción de agua: El basalto tiene una baja absorción de agua, lo que lo hace resistente a la humedad y la intemperie. Esta característica es importante en climas húmedos o áreas sujetas a ciclos de congelación y descongelación, donde la absorción de agua puede provocar daños y deterioro en los materiales de construcción (Rodríguez et al., 2021) [44].

En la tabla II.IV. se indican las propiedades físicas del basalto.

Tabla II.IV. Propiedades físicas del basalto.

Propiedad	Valor	Unidad
Resistencia a la compresión	30 – 420	Mpa
Resistencia a la flexión	14 – 26	Mpa
Resistencia a la tracción	6 – 12	Mpa
Densidad	2,750 – 3,000	Kg/m ³
Porosidad	0.2 – 1.5	%
Módulo de Young ϵ	20 – 100	Gpa
Coefficiente de Poisson	0.14 – 0.2	
Ángulo de fricción Φ	31 – 38	En grados (°)

Fuente: (Bieniawski, 1974) [45], (Brown, 1981) [46], (Hoek et al., 1981) [47], (Brady et al., 2004) [48]

2.2.5. Fosfoyeso.

El fosfoyeso es un subproducto industrial generado durante la producción de ácido fosfórico, utilizado principalmente en la fabricación de fertilizantes minerales y otros productos químicos. Este subproducto se forma a partir de la reacción entre roca fosfática y ácido sulfúrico, dando como resultado un residuo que contiene yeso (sulfato de calcio) impregnado con compuestos de fosfato y otros elementos químicos.

A pesar de ser un subproducto, el fosfoyeso presenta características y propiedades que lo hacen adecuado para diversas aplicaciones en la construcción, especialmente cuando se consideran enfoques de economía circular y sostenibilidad ambiental. A continuación, se describen algunas de las características y aplicaciones del fosfoyeso en la construcción:

Estabilización de suelos: Una de las aplicaciones principales del fosfoyeso en la construcción es su uso como estabilizador de suelos. Debido a su composición química y propiedades físicas, el fosfoyeso puede mejorar las propiedades de suelos blandos o poco cohesivos, aumentando su capacidad de carga y reduciendo su susceptibilidad a la erosión y la compactación (González et al., 2020) [49].

Mejora de las propiedades del hormigón: El fosfoyeso puede ser utilizado como aditivo en la producción de hormigón para mejorar algunas de sus propiedades físicas y mecánicas. La incorporación de fosfoyeso en el hormigón puede aumentar su resistencia a la compresión, mejorar su durabilidad frente a la corrosión y reducir la retracción volumétrica durante el fraguado y el curado (López et al., 2019) [50].

Fabricación de materiales de construcción: El fosfoyeso puede ser utilizado como materia prima en la fabricación de materiales de construcción como placas de yeso laminado, bloques de construcción y paneles de revestimiento. La mezcla de fosfoyeso con otros materiales de construcción puede producir productos finales con propiedades físicas y mecánicas adecuadas para su uso en una variedad de aplicaciones estructurales y no estructurales (Martínez et al., 2021) [51].

Control de la erosión: El fosfoyeso se puede utilizar como una capa de cobertura para controlar la erosión del suelo en áreas vulnerables, como taludes, terraplenes y áreas de relleno. La aplicación de fosfoyeso como cobertura superficial puede ayudar a prevenir la pérdida de suelo, reducir la escorrentía de agua y promover la revegetación de áreas degradadas (Pérez et al., 2020) [52].

Reciclaje y gestión de residuos: Al utilizar fosfoyeso como material de construcción, se promueve la reutilización de este subproducto industrial, evitando su disposición en vertederos y reduciendo el impacto ambiental asociado con su generación. Además, el uso de fosfoyeso en la construcción puede contribuir a cerrar el ciclo de vida de los materiales y fomentar prácticas de economía circular en la industria de la construcción (Rodríguez et al., 2018) [53].

(A.M. Rashad, 2018) [54] nos indica que El tamaño máximo de partícula del fosfoyeso (resultante del proceso húmedo) varía de 0.5 mm a 1.0 mm, el contenido de humedad oscila entre el 8% al 30%, su densidad aparente es de 0.9 a 1.7 g/cm³ y es altamente ácido (valor de pH alrededor de 1).

2.2.6. Material de Fresado de Carpeta Asfáltica.

Es carpeta asfáltica recuperada que se obtiene al retirar la capa de rodadura de un pavimento asfáltico existente. A continuación, se presentan algunas de las propiedades físicas del mismo:

Propiedades físicas.

1. Densidad: La densidad puede variar entre 2.2 y 2.5 g/cm³, dependiendo del tipo de asfalto y la cantidad de agregados presentes.
2. Peso específico: El peso específico es similar al del asfalto fresco, con valores que oscilan entre 1.02 y 1.05 g/cm³.
3. Contenido de asfalto: El contenido de asfalto puede variar entre 3% y 8% en peso, dependiendo del tipo de asfalto y la cantidad de agregados presentes.
4. Contenido de agregados: El contenido de agregados puede variar entre 85% y 95% en peso, dependiendo del tipo de agregados y la cantidad de asfalto presente.
5. Tamaño de partícula: El tamaño de partícula puede variar entre 0.075 mm y 25 mm, dependiendo del tipo de agregados y la cantidad de asfalto presente.

6. Forma de partícula: La forma de partícula puede ser angular, redondeada o plana, dependiendo del tipo de agregados y la cantidad de asfalto presente.

7. Porosidad: La porosidad puede variar entre 5% y 15%, dependiendo del tipo de agregados y la cantidad de asfalto presente.

8. Absorción de agua: La absorción de agua puede variar entre 1% y 5%, dependiendo del tipo de agregados y la cantidad de asfalto presente.

Propiedades mecánicas.

1. Resistencia a la compresión: La resistencia a la compresión puede variar entre 1,000 kPa y 3,000 kPa, dependiendo del tipo de agregados y la cantidad de asfalto presente.

2. Resistencia a la flexión: La resistencia a la flexión puede variar entre 500 kPa y 1,500 kPa, dependiendo del tipo de agregados y la cantidad de asfalto presente.

3. Módulo de elasticidad: El módulo de elasticidad puede variar entre 1,000 MPa y 3,000 MPa, dependiendo del tipo de agregados y la cantidad de asfalto presente.

Propiedades térmicas.

1. Conductividad térmica: La conductividad térmica puede variar entre 0.5 W/mK y 1.5 W/mK, dependiendo del tipo de agregados y la cantidad de asfalto presente.

2. Capacidad térmica: La capacidad térmica puede variar entre 800 J/kgK y 1,200 J/kgK, dependiendo del tipo de agregados y la cantidad de asfalto presente [55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62].

2.2.7. Morteros.

Los morteros son mezclas plásticas aglomerantes producto de la combinación de materiales tales como el agua más arena más cementantes.

En la tabla II.V se indica la clasificación de los morteros.

Tabla II.V. Clasificación de los morteros.

Tabla 11-1. Clasificación de los morteros.				
Tipo	Partes de cemento Portland	Partes de cemento Albañilería	Partes de Cal	Partes de arena
1	1	0	0 a ¼	No menos de 2.25 ni más de 4 veces la suma de cementantes en volumen
	1	0 a ½	0	
2	1	0	¼ a ½	
	1	½ a 1	0	
3	1	0	½ a ¼	
Fuente: (N-CMT-2-01-004/02) [63]				

En la tabla II.VI. se indican las propiedades físicas del mortero (adherencia).

Tabla II.VI. Propiedades físicas del mortero (adherencia).

Propiedad	Valor	Unidad
Resistencia a la compresión	4 – 12.5	MPa
Fluidez	105 – 130	%
Revenimiento	160	mm
Absorción	10 – 23	%
Consistencia	63 – 79	mm
Retención del agua	75 (mínimo)	%

Fuente: (NMX-C-486-ONNCCE-2014) [64]

2.3. Características y propiedades de los adoquines y ladrillos fabricados con materiales reciclados.

Los adoquines y ladrillos fabricados con materiales reciclados poseen una serie de características y propiedades que los hacen distintivos en

comparación con los productos tradicionales. Estas características y propiedades no solo determinan su apariencia física, sino también su desempeño y su contribución a la sostenibilidad ambiental. A continuación, se detallan algunas de estas características y propiedades:

Resistencia mecánica: Los adoquines y ladrillos fabricados con materiales reciclados pueden exhibir una resistencia mecánica comparable o incluso superior a la de los productos tradicionales. Esto se debe a la selección adecuada de los materiales reciclados y a la formulación precisa de las mezclas, lo que permite obtener productos finales con una alta resistencia a la compresión y la flexión (López et al., 2021) [65].

Durabilidad: Estos productos suelen tener una buena durabilidad, lo que les permite resistir el desgaste y la degradación causados por factores ambientales como la exposición al sol, la lluvia y el tráfico peatonal y vehicular. La durabilidad de los adoquines y ladrillos fabricados con materiales reciclados contribuye a su vida útil prolongada y a la reducción de la necesidad de mantenimiento y reemplazo frecuente (López et al., 2021) [65].

Estabilidad dimensional: Los materiales reciclados utilizados en la fabricación de adoquines y ladrillos suelen tener una buena estabilidad dimensional, lo que significa que mantienen su forma y tamaño original a lo largo del tiempo. Esto es importante para garantizar la integridad estructural y la estética de los pavimentos y revestimientos contruidos con estos productos (García et al., 2019) [66].

Color y textura: Los adoquines y ladrillos fabricados con materiales reciclados pueden presentar una amplia variedad de colores y texturas, dependiendo de los materiales reciclados utilizados y el proceso de fabricación. Esto permite una mayor versatilidad en el diseño y la decoración de espacios urbanos y

arquitectónicos, así como la integración estética con el entorno circundante (Rodríguez et al., 2018) [67].

Permeabilidad: Algunos adoquines y ladrillos fabricados con materiales reciclados pueden ser permeables al agua, lo que permite la infiltración del agua de lluvia en el suelo y reduce la escorrentía superficial. Esta característica contribuye a la gestión sostenible del agua y la prevención de inundaciones urbanas, además de promover la recarga de acuíferos subterráneos (Pérez et al., 2021) [68].

Sostenibilidad ambiental: Quizás una de las características más destacadas de los adoquines y ladrillos fabricados con materiales reciclados es su contribución a la sostenibilidad ambiental. Al utilizar materiales reciclados en lugar de materias primas vírgenes, se reduce la extracción de recursos naturales y se minimiza la generación de residuos, lo que contribuye a la conservación del medio ambiente y la mitigación del cambio climático (Sánchez et al., 2022) [69].

2.4. Evaluación de la resistencia mecánica, durabilidad y otras propiedades relevantes de los adoquines y ladrillos.

La evaluación de la resistencia mecánica, durabilidad y otras propiedades relevantes de los adoquines y ladrillos fabricados con materiales reciclados es fundamental para garantizar su calidad y rendimiento en aplicaciones de construcción. A continuación, se describen algunas de las pruebas y métodos de evaluación utilizados para determinar estas propiedades:

Resistencia a la compresión: La resistencia a la compresión es una medida de la capacidad de un material para resistir fuerzas de compresión. Esta propiedad se evalúa mediante ensayos de compresión realizados en muestras

representativas de adoquines y ladrillos, siguiendo normativas específicas que establecen los procedimientos y equipos necesarios para llevar a cabo las pruebas (López et al., 2021) [65].

Resistencia a la flexión: La resistencia a la flexión es la capacidad de un material para resistir fuerzas aplicadas en dirección perpendicular a su eje longitudinal. Esta propiedad se evalúa mediante ensayos de flexión en vigas o probetas, donde se aplica una carga gradual hasta que se produce la fractura del material. La resistencia a la flexión es importante para determinar la capacidad de los adoquines y ladrillos para soportar cargas distribuidas y concentradas (López et al., 2021) [65].

Absorción de agua: La absorción de agua es una medida de la cantidad de agua que un material puede absorber cuando se sumerge en agua durante un período de tiempo determinado. Esta propiedad se evalúa mediante ensayos de inmersión, donde se mide el aumento de peso de las muestras después de un período de absorción. Una baja absorción de agua es indicativa de una buena durabilidad y resistencia a la intemperie de los adoquines y ladrillos (Pérez et al., 2021) [70].

Pérdida de masa por abrasión: La pérdida de masa por abrasión es una medida de la resistencia al desgaste de un material cuando está expuesto a la acción abrasiva de partículas sólidas. Esta propiedad se evalúa mediante ensayos de abrasión, donde se someten las muestras a ciclos de abrasión en un equipo específico y se mide la pérdida de masa resultante. Una baja pérdida de masa por abrasión indica una buena resistencia al desgaste y una mayor durabilidad en aplicaciones de tráfico peatonal y vehicular (Rodríguez et al., 2018) [67].

Estabilidad dimensional: La estabilidad dimensional es la capacidad de un material para mantener su forma y tamaño original bajo diferentes condiciones ambientales, como cambios de temperatura y humedad. Esta propiedad se evalúa mediante ensayos de contracción y expansión térmica, donde se someten las muestras a condiciones ambientales controladas y se mide su cambio dimensional. Una buena estabilidad dimensional es crucial para garantizar la integridad estructural y la estética de los pavimentos y revestimientos contruidos con adoquines y ladrillos (García et al., 2019) [66].

Permeabilidad al agua: La permeabilidad al agua es la capacidad de un material para permitir el paso del agua a través de su estructura. Esta propiedad se evalúa mediante ensayos de permeabilidad, donde se mide la cantidad de agua que atraviesa las muestras en un tiempo determinado bajo una diferencia de presión específica. Una permeabilidad controlada es importante para la gestión sostenible del agua y la prevención de inundaciones urbanas en aplicaciones de pavimentación (Sánchez et al., 2021) [69].

2.5. Proceso tecnológico para la obtención de piezas de materiales compuestos.

El proceso tecnológico para la obtención de piezas de materiales compuestos implica varias etapas que se describen a continuación:

Diseño.

1. Creación del diseño de la pieza: se utiliza software de diseño asistido por computadora (CAD) para crear un modelo digital de la pieza y/o se investigan las dimensiones que son necesarias para su aplicación en el proyecto propuesto.

2. Selección del material: se selecciona el material adecuado para la pieza en función de sus propiedades y requerimientos.

Preparación del material.

1. Selección del material en bruto: se selecciona el material en bruto adecuado para la pieza.

2. Limpieza y preparación del material: se limpia y prepara el material para su procesamiento.

Procesos de fabricación.

1. Corte: se corta el material en la forma y tamaño requeridos utilizando técnicas como corte por láser, corte por plasma, corte por agua a alta presión, etc.

2. Mecanizado: se mecaniza el material para darle la forma y tamaño requeridos utilizando técnicas como fresado, taladrado, roscado, etc.

3. Soldadura: se une el material utilizando técnicas como soldadura por arco, soldadura por resistencia, soldadura por ultrasonido, etc.

4. Tratamiento térmico: se realiza la sinterización y/o fusión de dos o más materiales a diferentes temperaturas de calentamiento.

5. Moldeado: se moldea el material para darle la forma requerida utilizando técnicas como moldeado por inyección, moldeado por compresión, etc.

6. Pulido: se pule el material para darle un acabado suave y brillante.

Procesos de acabado.

1. Pintura: se aplica pintura al material para darle un color y acabado requeridos.

2. Barnizado: se aplica barniz al material para darle un acabado brillante y protegerlo del desgaste.
3. Cromado: se aplica cromo al material para darle un acabado brillante y resistente a la corrosión.
4. Grabado: se graba el material para darle un diseño o texto requeridos.

Inspección y ensayo.

1. Inspección visual: se inspecciona la pieza para detectar defectos o irregularidades.
2. Ensayo de resistencia: se ensaya la pieza para determinar su resistencia a la tensión, compresión, flexión, etc.
3. Ensayo de corrosión: se ensaya la pieza para determinar su resistencia a la corrosión [71].

2.5.1 Proceso de adquisición de los materiales iniciales.

El proceso de adquisición de los materiales implica varias etapas que se describen a continuación:

Etapas 1: Identificación de los requisitos.

- Se identifican los requisitos del material, incluyendo propiedades como la resistencia, la dureza, la conductividad térmica, etc.
- Se consideran factores como la aplicación, el entorno y las condiciones de uso del material.

Etapas 2: Selección del tipo de material.

- Se selecciona el tipo de material adecuado para la aplicación, considerando factores como la composición química, la estructura cristalina y las propiedades físicas.
- Se pueden considerar materiales como óxidos, carburos, nitruros, etc.

Etapa 3: Selección del proveedor.

- Se selecciona un proveedor de materiales que cumpla con los requisitos de calidad, precio y entrega.
- Se pueden considerar factores como la experiencia del proveedor, la capacidad de producción y la certificación de calidad.

Etapa 4: Adquisición del material.

- Se adquiere el material del proveedor seleccionado, considerando factores como la cantidad, la calidad y el precio.
- Se pueden realizar pruebas y ensayos para verificar la calidad del material.

Etapa 5: Inspección y evaluación.

- Se inspecciona y se evalúa el material para asegurarse de que cumpla con los requisitos y las especificaciones.
- Se pueden realizar pruebas adicionales para evaluar la resistencia, la dureza y otras propiedades del material.

Etapa 6: Almacenamiento y manipulación.

- Se almacena y se manipula el material de manera adecuada para evitar daños o deterioro.

- Se pueden considerar factores como la humedad, la temperatura y la exposición a la luz.

Etapa 7: Documentación y registro.

- Se documenta y se registra la adquisición del material, incluyendo información como la cantidad, la calidad y el precio.
- Se pueden considerar factores como la trazabilidad y la certificación de calidad.

Factores que influyen en la adquisición de materiales.

- La disponibilidad y el costo del material.
- La calidad y la consistencia del material.
- La experiencia y la reputación del proveedor.
- La capacidad de producción y la entrega del material.
- La certificación de calidad y la trazabilidad del material.

Técnicas de adquisición de materiales.

- Compra directa del proveedor.
- Subasta pública.
- Contratación de un agente o un distribuidor.
- Adquisición a través de una plataforma en línea.
- Negociación directa con el proveedor [71].

2.5.2. Proceso de molienda de los materiales iniciales.

El proceso de molienda de los materiales implica la reducción del tamaño de partículas de un material para obtener un polvo o una suspensión con

propiedades específicas. A continuación, se describe el proceso de molienda de materiales:

Etapa 1: Selección del material.

- Se selecciona el material que se va a moler, considerando factores como la composición química, la estructura cristalina y las propiedades físicas.

Etapa 2: Preparación del material.

- Se prepara el material para la molienda, incluyendo la limpieza, el secado y la eliminación de impurezas.

Etapa 3: Selección del molino.

- Se selecciona el molino adecuado para la molienda del material, considerando factores como la capacidad de procesamiento, la velocidad de rotación y el tipo de molienda (por ejemplo, molienda seca o húmeda).

Etapa 4: Molienda.

- Se realiza la molienda del material utilizando el molino seleccionado, ajustando parámetros como la velocidad de rotación, la carga de material y el tiempo de molienda.

Etapa 5: Clasificación del polvo.

- Se clasifica el polvo obtenido en función de su tamaño de partícula, utilizando técnicas como la criba, la centrifugación o la sedimentación.

Etapas 6: Inspección y evaluación.

- Se inspecciona y se evalúa el polvo obtenido para asegurarse de que cumpla con los requisitos de tamaño de partícula, distribución de tamaño de partícula y pureza.

Tipos de molinos utilizados en la molienda de materiales.

- Molinos de bolas
- Molinos de rodillos
- Molinos de martillos
- Molinos de discos
- Molinos de alta velocidad

Factores que influyen en la molienda de materiales.

- La dureza y la fragilidad del material
- La velocidad de rotación y la carga de material del molino
- El tipo de molienda (seca o húmeda)
- La temperatura y la humedad del entorno
- La pureza y la composición química del material

Aplicaciones de la molienda de materiales.

- Producción de polvos cerámicos para la fabricación de componentes electrónicos
- Producción de pigmentos para la industria de la pintura
- Producción de materiales de desgaste para la industria de la construcción
- Producción de materiales de filtración para la industria del agua y el aire [71].

2.5.3. Proceso de tamizado de materiales iniciales.

El proceso de tamizado de los materiales es una técnica utilizada para separar y clasificar partículas de diferentes tamaños en un material. A continuación, se describe el proceso de tamizado de los materiales:

Etapa 1: Preparación del material.

- Se prepara el material para el tamizado, incluyendo la limpieza, el secado y la eliminación de impurezas.

Etapa 2: Selección del tamiz.

- Se selecciona el tamiz adecuado para el material, considerando factores como el tamaño de la malla, el material del tamiz y la forma del tamiz.

Etapa 3: Tamizado.

- Se realiza el tamizado del material utilizando el tamiz seleccionado, ajustando parámetros como la velocidad de vibración, la amplitud de vibración y el tiempo de tamizado.

Etapa 4: Clasificación de las partículas.

- Se clasifican las partículas en función de su tamaño, utilizando la malla del tamiz como referencia.

Etapa 5: Inspección y evaluación.

- Se inspecciona y se evalúa el material tamizado para asegurarse de que cumpla con los requisitos de tamaño de partícula y distribución de tamaño de partícula.

Tipos de tamices utilizados en la industria.

- Tamices de malla metálica
- Tamices de malla de nylon
- Tamices de malla de poliéster
- Tamices de malla de seda
- Tamices de malla de acero inoxidable

Factores que influyen en el tamizado de materiales.

- La forma y el tamaño de las partículas
- La densidad y la dureza del material
- La velocidad y la amplitud de vibración del tamiz
- La temperatura y la humedad del entorno
- La pureza y la composición química del material

Aplicaciones del tamizado de materiales.

- Producción de polvos para la fabricación de componentes electrónicos
- Producción de pigmentos para la industria de la pintura
- Producción de materiales de desgaste para la industria de la construcción
- Producción de materiales de filtración para la industria del agua y el aire
- Producción de materiales de aislamiento para la industria de la energía.

Ventajas del tamizado de materiales.

- Permite la separación y clasificación de partículas de diferentes tamaños
- Mejora la uniformidad y la consistencia del material
- Reduce la cantidad de impurezas y defectos en el material
- Permite la producción de materiales con propiedades específicas
- Mejora la eficiencia y la productividad en la industria [71].

2.5.4. Proceso de homogenización de los materiales iniciales.

El proceso de homogenización de los materiales es una técnica utilizada para mezclar y distribuir uniformemente las partículas de diferentes tamaños y composiciones en un material. A continuación, se describe el proceso de homogenización de materiales:

Etapas 1: Preparación de los componentes.

- Se preparan los componentes del material, incluyendo la selección de los materiales, la limpieza y el secado.

Etapas 2: Mezcla de los componentes.

- Se mezclan los componentes del material en una proporción específica, utilizando técnicas como la mezcla seca o la mezcla húmeda.

Etapas 3: Homogenización.

- Se realiza la homogenización del material utilizando técnicas como la mezcla intensiva, la mezcla de alta energía o la mezcla de baja energía.

Técnicas de homogenización de materiales.

- Mezcla intensiva: se utiliza una mezcladora intensiva para mezclar los componentes del material.
- Mezcla de alta energía: se utiliza una mezcladora de alta energía para mezclar los componentes del material.
- Mezcla de baja energía: se utiliza una mezcladora de baja energía para mezclar los componentes del material.
- Mezcla de ultrasonido: se utiliza un ultrasonido para mezclar los componentes del material.

Factores que influyen en la homogenización de materiales.

- La forma y el tamaño de las partículas
- La densidad y la dureza del material
- La velocidad y la amplitud de mezcla
- La temperatura y la humedad del entorno
- La pureza y la composición química del material

Aplicaciones de la homogenización de materiales.

- Producción de polvos para la fabricación de componentes electrónicos
- Producción de pigmentos cerámicos para la industria de la pintura
- Producción de materiales de desgaste para la industria de la construcción
- Producción de materiales de filtración para la industria del agua y el aire
- Producción de materiales de aislamiento para la industria de la energía.

Ventajas de la homogenización de materiales.

- Permite la mezcla y distribución uniforme de las partículas
- Mejora la uniformidad y la consistencia del material
- Reduce la cantidad de impurezas y defectos en el material

- Permite la producción de materiales con propiedades específicas
- Mejora la eficiencia y la productividad en la industria [71].

2.5.5. Proceso de sinterización para la obtención del material compuesto.

El proceso de sinterización de los materiales es una técnica utilizada para producir materiales densos y resistentes a partir de polvos o partículas finas. A continuación, se describe el proceso de sinterización de materiales:

1. Preparación del polvo: Se selecciona y se prepara el polvo, incluyendo la molienda y la mezcla de los componentes.
2. Formación del verde: Se forma el verde, que es la pieza compuesta en su estado inicial, utilizando técnicas como el prensado, el moldeado o la inyección.
3. Secado: Se seca el verde para eliminar la humedad y prevenir la deformación durante el proceso de sinterización.
4. Sinterización: Se somete el verde a un proceso de sinterización, que implica la aplicación de calor y presión para fusionar las partículas y formar un material denso y resistente.
5. Enfriamiento: Se enfría el material sinterizado para prevenir la deformación y el agrietamiento.
6. Inspección y prueba: Se inspecciona y se prueba el material sinterizado para asegurarse de que cumpla con los requisitos de calidad y resistencia.

Tipos de sinterización:

- Sinterización en atmósfera controlada
- Sinterización en vacío
- Sinterización por presión
- Sinterización por inyección de gas

- Sinterización por radiación

Variables que afectan el proceso de sinterización:

- Temperatura
- Presión
- Tiempo
- Atmósfera
- Tipo de material
- Tamaño de partícula

Aplicaciones de la sinterización de materiales:

- Producción de componentes electrónicos
- Producción de piezas de maquinaria
- Producción de materiales de desgaste
- Producción de materiales de filtración
- Producción de materiales de aislamiento [71].

2.6. Resistencia a la compresión en materiales compuestos.

La resistencia a la compresión en materiales compuestos es la capacidad del material para soportar cargas compresivas sin deformarse o romperse. Se mide en unidades de presión, como megapascuales (MPa) o gigapascuales (GPa).

Factores que afectan la resistencia a la compresión en materiales:

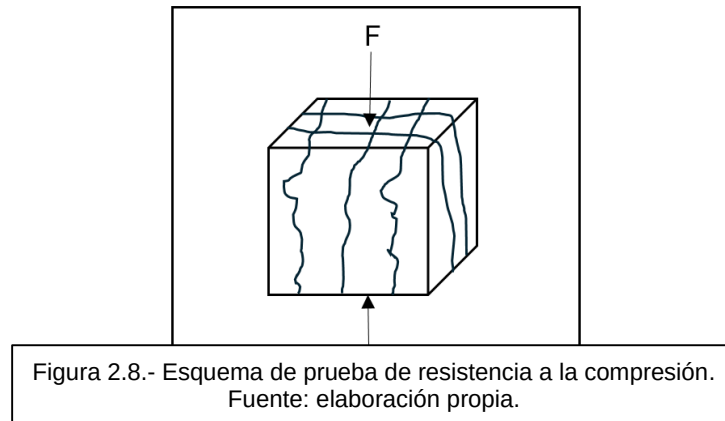
1. Composición química: La resistencia a la compresión puede variar dependiendo de la composición química del material.

2. Estructura cristalina: La estructura cristalina del material puede afectar su resistencia a la compresión.
3. Porosidad: La porosidad del material puede reducir su resistencia a la compresión.
4. Tamaño de grano: El tamaño de grano del material puede afectar su resistencia a la compresión.
5. Tratamientos térmicos: Los tratamientos térmicos pueden afectar la resistencia a la compresión del material.

El proceso de la prueba de resistencia a la compresión en materiales implica los siguientes pasos:

1. Preparación de la muestra: Se prepara la muestra según las normas y especificaciones requeridas.
2. Acondicionamiento de la muestra: Se acondiciona la muestra a la temperatura y humedad adecuadas para la prueba.
3. Montaje de la muestra: Se monta la muestra en la máquina de prueba de compresión.
4. Aplicación de la carga: Se aplica la carga compresiva a la muestra de manera gradual y controlada.
5. Medición de la deformación: Se mide la deformación de la muestra durante la aplicación de la carga.
6. Registro de la carga y deformación: Se registra la carga y deformación durante la prueba.
7. Determinación de la resistencia a la compresión: Se determina la resistencia a la compresión a partir de la carga máxima aplicada antes de la falla.
8. Inspección de la falla: Se inspecciona la muestra después de la falla para determinar el modo de falla [72].

En la figura 2.8. se ilustra el esquema de la prueba de resistencia a la compresión.



2.7. Resistencia a la flexión en materiales compuestos.

La resistencia a la flexión en materiales compuestos es la capacidad del material para soportar cargas de flexión sin deformarse o romperse. Se mide en unidades de presión, como megapascuales (MPa) o gigapascuales (GPa).

Factores que afectan la resistencia a la flexión en materiales:

1. Composición química: La resistencia a la flexión puede variar dependiendo de la composición química del material.
2. Estructura cristalina: La estructura cristalina del material puede afectar su resistencia a la flexión.
3. Porosidad: La porosidad del material puede reducir su resistencia a la flexión.
4. Tamaño de grano: El tamaño de grano del material puede afectar su resistencia a la flexión.

5. Tratamientos térmicos: Los tratamientos térmicos pueden afectar la resistencia a la flexión del material.

El proceso de la prueba de resistencia a la flexión en materiales implica los siguientes pasos:

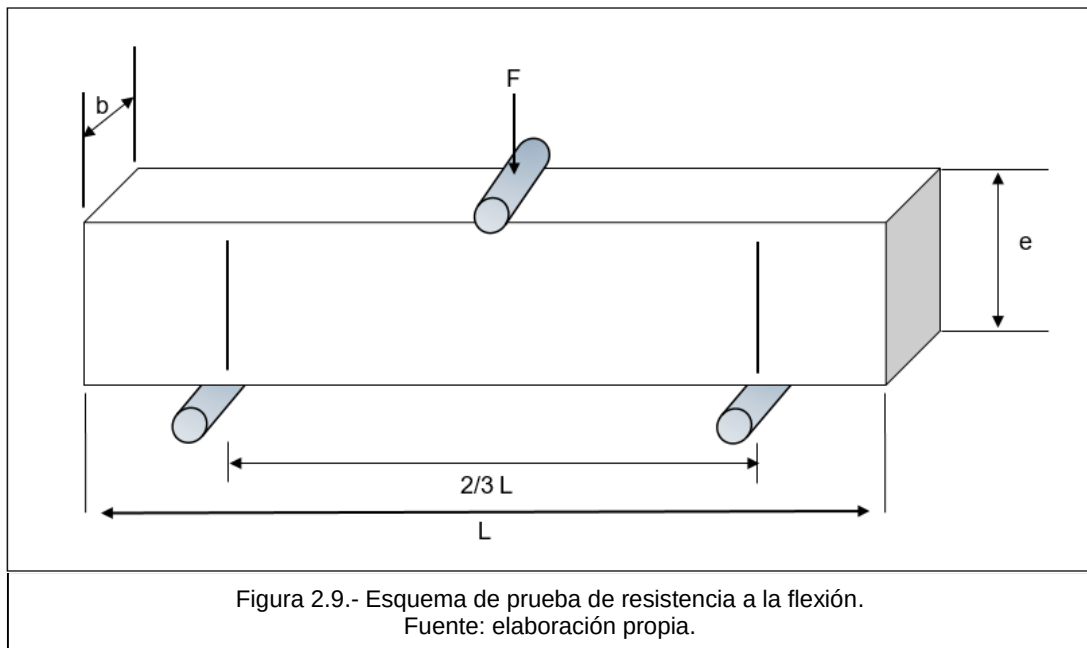
1. Preparación de la muestra: Se prepara la muestra según las normas y especificaciones requeridas.
2. Acondicionamiento de la muestra: Se acondiciona la muestra a la temperatura y humedad adecuadas para la prueba.
3. Montaje de la muestra: Se monta la muestra en la máquina de prueba de flexión.
4. Aplicación de la carga: Se aplica la carga de flexión a la muestra de manera gradual y controlada.
5. Medición de la deformación: Se mide la deformación de la muestra durante la aplicación de la carga.
6. Registro de la carga y deformación: Se registra la carga y deformación durante la prueba.
7. Determinación de la resistencia a la flexión: Se determina la resistencia a la flexión a partir de la carga máxima aplicada antes de la falla.
8. Inspección de la falla: Se inspecciona la muestra después de la falla para determinar el modo de falla.

Tipos de pruebas de resistencia a la flexión:

- Prueba de flexión en tres puntos: La muestra se apoya en dos puntos y se aplica la carga en el punto central.
- Prueba de flexión en cuatro puntos: La muestra se apoya en cuatro puntos y se aplica la carga en dos puntos centrales.

- Prueba de flexión por torsión: La muestra se somete a una carga de torsión para evaluar su resistencia a la flexión [72].

En la figura 2.9. se ilustra el esquema de la prueba de resistencia a la flexión.



2.8. Proceso tribológico para obtener la deformación de una pieza de material compuesto.

El proceso tribológico para obtener la deformación de una pieza de material compuesto implica la interacción entre la superficie de la pieza y la herramienta o el medio ambiente que la rodea. A continuación, se describe el proceso tribológico para obtener la deformación de una pieza de material:

Etapas 1: Preparación de la superficie.

- La superficie de la pieza de material se limpia y se prepara para el proceso de deformación.
- Se elimina cualquier residuo o contaminante que pueda afectar la adherencia entre la superficie y la herramienta.

Etapa 2: Selección de la herramienta.

- Se selecciona la herramienta adecuada para la deformación de la pieza, teniendo en cuenta factores como la dureza, la rugosidad y la geometría de la herramienta.
- La herramienta puede ser una herramienta de corte, una herramienta de presión o una herramienta de fricción.

Etapa 3: Aplicación de la carga.

- Se aplica la carga adecuada a la herramienta para producir la deformación deseada en la pieza.
- La carga puede ser una fuerza normal, una fuerza tangencial o una combinación de ambas.

Etapa 4: Movimiento relativo.

- Se produce el movimiento relativo entre la herramienta y la pieza, lo que genera la fricción y la deformación de la superficie.
- El movimiento relativo puede ser lineal, rotativo o una combinación de ambos.

Etapa 5: Desarrollo de la deformación.

- La deformación de la superficie se desarrolla a medida que la herramienta interactúa con la pieza.

- La deformación puede ser elástica, plástica o una combinación de ambas.

Etapa 6: Estabilización de la deformación.

- La deformación se estabiliza cuando la herramienta deja de interactuar con la pieza.
- La deformación puede ser permanente o temporal, dependiendo de la naturaleza del material y la herramienta.

Etapa 7: Inspección y evaluación.

- Se inspecciona y se evalúa la deformación de la pieza para asegurarse de que cumpla con los requisitos deseados.
- Se pueden realizar pruebas adicionales para evaluar la resistencia, la dureza y otras propiedades del material.

Factores que influyen en el proceso tribológico.

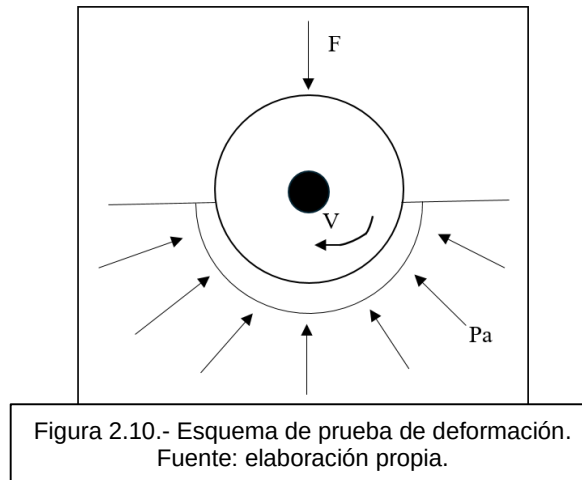
- La dureza y la rugosidad de la herramienta y la pieza.
- La geometría y la orientación de la herramienta y la pieza.
- La carga y el movimiento relativo entre la herramienta y la pieza.
- La temperatura y la humedad del entorno.
- La naturaleza del material y su comportamiento bajo diferentes condiciones.

Técnicas de deformación de materiales.

- Corte con herramienta de corte.
- Prensa con herramienta de presión.
- Fricción con herramienta de fricción.
- Abrasión con herramienta de abrasión.

- Erosión con herramienta de erosión [71].

En la figura 2.10. se ilustra el esquema de la prueba de deformación.



2.9. Absorción en materiales compuestos.

La absorción en materiales compuestos se refiere a la capacidad del material para absorber líquidos o gases. La absorción puede ser medida en términos de porcentaje de absorción, que es la cantidad de líquido o gas absorbido por el material en relación con su peso o volumen.

Factores que afectan la absorción en materiales:

1. Porosidad: La porosidad del material es el factor más importante que afecta la absorción. Los materiales con alta porosidad tienen una mayor capacidad de absorción.
2. Tamaño de poro: El tamaño de los poros también afecta la absorción. Los poros más pequeños pueden absorber líquidos o gases más fácilmente que los poros más grandes.

3. Forma de los poros: La forma de los poros también puede afectar la absorción. Los poros con forma de canal pueden absorber líquidos o gases más fácilmente que los poros con forma de esfera.
4. Composición química: La composición química del material también puede afectar la absorción. Algunos materiales pueden ser más propensos a absorber ciertos líquidos o gases que otros.
5. Tratamientos térmicos: Los tratamientos térmicos pueden afectar la absorción en materiales. El calentamiento o enfriamiento del material puede cambiar su porosidad y capacidad de absorción.

Métodos para medir la absorción en materiales:

1. Método de inmersión: Se sumerge el material en un líquido y se mide el peso o volumen absorbido.
2. Método de succión: Se aplica una succión al material y se mide el líquido o gas absorbido.
3. Método de permeabilidad: Se mide la tasa a la que un líquido o gas pasa a través del material.

Aplicaciones de la absorción en materiales:

1. Filtros: Los materiales con alta absorción se utilizan en filtros para separar líquidos o gases.
2. Adsorbentes: Los materiales con alta absorción se utilizan en adsorbentes para eliminar impurezas del aire o del agua.
3. Materiales de construcción: Los materiales con baja absorción se utilizan en la construcción para evitar la penetración de agua o humedad.
4. Materiales de laboratorio: Los materiales con alta absorción se utilizan en laboratorios para absorber líquidos o gases en experimentos.

El proceso de absorción en materiales implica los siguientes pasos:

1. Penetración del líquido o gas: El líquido o gas entra en contacto con la superficie del material y penetra en los poros.
2. Difusión: El líquido o gas se difunde a través de los poros y canales del material.
3. Adsorción: El líquido o gas se adsorbe en la superficie de los poros y canales del material.
4. Capilaridad: El líquido o gas se mueve a través de los poros y canales del material debido a la capilaridad.
5. Absorción: El líquido o gas se absorbe en el material y se distribuye uniformemente a través de la estructura porosa.

Mecanismos de absorción:

1. Absorción por capilaridad
2. Absorción por difusión
3. Absorción por adsorción

Aplicaciones del proceso de absorción en materiales:

1. Filtros
2. Adsorbentes
3. Materiales de construcción
4. Materiales de laboratorio [72]

2.10. Proceso de dilatación térmica en materiales compuestos.

La dilatación térmica en materiales compuestos se refiere al cambio en las dimensiones de un material cuando se somete a un cambio de temperatura.

La dilatación térmica es una propiedad importante en la selección de materiales para aplicaciones específicas.

Tipos de dilatación térmica:

1. Dilatación lineal: cambio en la longitud de un material con el cambio de temperatura.
2. Dilatación superficial: cambio en el área superficial de un material con el cambio de temperatura.
3. Dilatación volumétrica: cambio en el volumen de un material con el cambio de temperatura.

Factores que influyen en la dilatación térmica:

1. Composición química: la composición química del material afecta su dilatación térmica.
2. Estructura cristalina: la estructura cristalina del material influye en su dilatación térmica.
3. Porosidad: la porosidad del material puede afectar su dilatación térmica.
4. Tratamientos térmicos: los tratamientos térmicos pueden influir en la dilatación térmica del material.

Aplicaciones de la dilatación térmica en materiales:

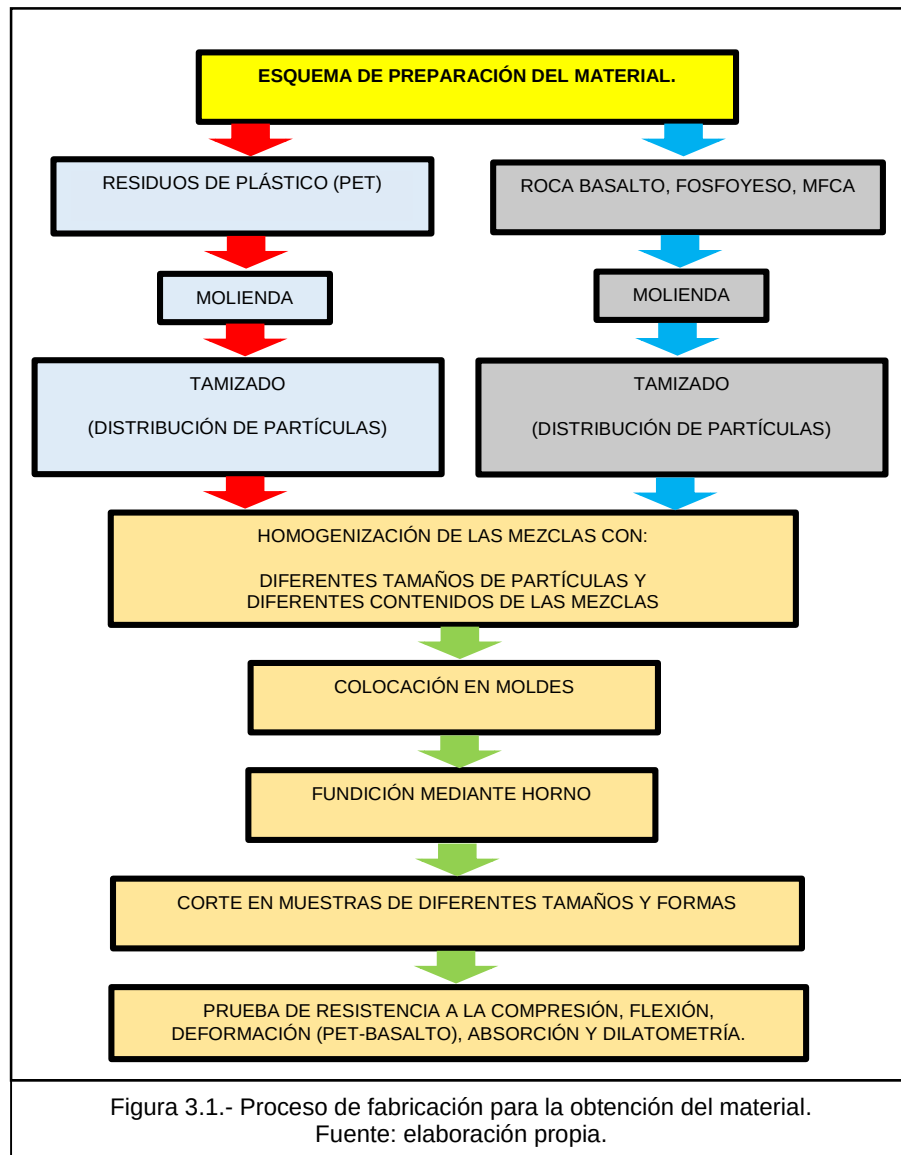
1. Componentes electrónicos
2. Materiales de aislamiento térmico
3. Materiales de construcción
4. Materiales de laboratorio

El proceso de dilatación térmica en materiales implica los siguientes pasos:

1. Calentamiento: El material se somete a un aumento de temperatura.
2. Expansión: El material se expande debido al aumento de temperatura, lo que provoca un aumento en las distancias entre las partículas.
3. Deformación: La expansión del material provoca una deformación en su forma y estructura.
4. Cambio en la estructura cristalina: El aumento de temperatura puede provocar un cambio en la estructura cristalina del material, lo que afecta su dilatación térmica.
5. Contracción: Cuando el material se enfría, se contrae y vuelve a su forma original [71].

Capítulo 3. Desarrollo experimental.

Para la obtención de un material con mezclas PET - Basalto, PET-Fosfoyeso y PET-MFCA (Material de fresado de carpeta asfáltica) que se puedan aplicar en la industria de la construcción, se llevó a cabo el siguiente proceso de fabricación (Ver figura 3.1):



3.1. Residuos de plástico PET.

La adquisición del plástico PET (botellas) fue mediante la recolecta, ubicado en contenedores de materiales de desperdicio.

Por otra parte, se logró el contacto con un proveedor de reciclaje y triturado de Plástico PET, el cual, se adquirió el material ya cortado con un tamaño de partículas de 19.05 mm aproximadamente (*ver figura 3.2*).



Figura 3.2.- Plástico PET adquirido.
Fuente: elaboración propia.

3.2. Roca Basalto.

Aplicando lo indicado en la norma vigente M-MMP-4-04-001/02 (muestreo de materiales pétreos para mezclas asfálticas) [73] de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, se llevó a cabo la recolección de la muestra de basalto ya triturado con un tamaño máximo del agregado de 9.525 mm a finos (polvos) en la planta de trituración, ubicada en el tramo carretero Alpuyeca-Puente de Ixtla (*ver figuras 3.3 y 3.4*), en el municipio de Xochitepec del estado de Morelos.



Figura 3.3.- Planta de trituración.
Fuente: elaboración propia.



Figura 3.4.- Extracción de Basalto.
Fuente: elaboración propia.

3.3. Fosfoyeso.

El Fosfoyeso utilizado proviene de una fábrica de fertilizantes (*ver figura 3.5*).

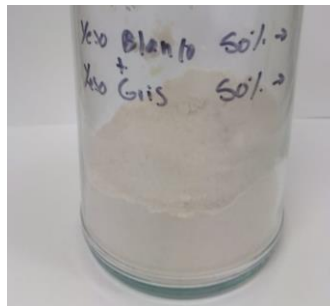


Figura 3.5.- Fosfoyeso.
Fuente: elaboración propia.

3.4. Material de Fresado de Carpeta Asfáltica.

La adquisición del material de fresado de carpeta asfáltica (*ver figura 3.6*) fue a través de la extracción de un banco de desperdicio ubicado en las instalaciones de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos que recientemente habían fresado la vialidad adquiriendo tamaños de partículas variables desde bloques mayores a 25.4 mm a granos de 0.595 mm.



Figura 3.6.- Material de fresado de carpeta asfáltica.
Fuente: elaboración propia.

3.5. Proceso de molienda de residuos de plástico PET.

En este procedimiento se llevó a cabo mediante el proceso de corte de las botellas utilizando equipo de corte menor, hasta lograr obtener el tamaño de los residuos en forma de placas de dimensiones de 4.75 mm aproximadamente (*ver figura 3.7*).

Así mismo, con un proveedor de reciclaje y triturado de Plástico PET, se adquirió el material ya cortado con un tamaño de partículas de 19.05 mm aproximadamente.



Figura 3.7.- Plástico PET triturado.
Fuente: elaboración propia.

3.6. Proceso de molienda de Roca Basalto.

El proceso de molienda de la roca basalto no se realizó, debido a que ya se contaba con el de manera triturada, con el tamaño del agregado de 9.525 mm a finos (polvos).

3.7. Proceso de molienda de Fosfoyeso.

El proceso de molienda de Fosfoyeso no se realizó, debido a que ya se contaba con el material de manera triturada, con el tamaño de partículas de 0.25 mm a finos (polvos).

3.8. Proceso de molienda de Material de Fresado de Carpeta Asfáltica.

El proceso de molienda de Material de Fresado de Carpeta Asfáltica (MFCA) se realizó ocupando tres equipos de trituración para poder obtener el tamaño de partículas a utilizar.

El primero fue una maquina con capacidad de triturar rocas de tamaño de 76.2 mm de diámetro (*ver figura 3.8*), el segundo es la máquina de desgaste de los ángeles (*ver figura 3.9*) que se ocupa en la prueba de abrasión de agregados pétreos para mezclas asfálticas M-MMP-4-04-006/02 (desgaste mediante la prueba de los ángeles de materiales pétreos para mezclas asfálticas) [74], y el tercero que se ocupo fue un molino de trituración marca Retsch modelo PM400/2 (*ver figura 3.10*).



Figura 3.8.- Trituradora de roca.
Fuente: elaboración propia.



Figura 3.9.- Máquina Ángeles.
Fuente: elaboración propia.



Figura 3.10.- Equipo Retsch PM400/2.
Fuente: elaboración propia.

3.9. Proceso de tamizado de residuos de plástico PET.

El tamizado del plástico PET no se realizó debido a que ya se contaba con placas de dimensiones de 4.75 mm y 19.05 mm aproximadamente.

3.10. Proceso de tamizado de Roca Basalto.

Para este proceso de tamizado del basalto, se utilizaron las mallas metálicas con aberturas de 0.595 mm y 1.41 mm; este proceso se llevó a cabo aplicando lo indicado en la normativa vigente M-MMP-4-04-002/02 (granulometría de

materiales pétreos para mezclas asfálticas) [75], de la secretaría de comunicaciones y transportes.

3.11. Proceso de tamizado de Fosfoyeso.

El tamizado de Fosfoyeso no se realizó debido a que ya se contaba con el material de manera triturada, con el tamaño de partículas de 0.25 mm a finos (polvos).

3.12. Proceso de tamizado de Material de Fresado de Carpeta Asfáltica.

Para este proceso de tamizado del basalto, se utilizaron las mallas metálicas con aberturas de 0.595 mm y 9.53 mm; este proceso se llevó a cabo aplicando lo indicado en la normativa vigente M-MMP-4-04-002/02 (granulometría de materiales pétreos para mezclas asfálticas) [75], de la secretaría de comunicaciones y transportes.

3.13. Homogenización de mezclas PET-Basalto, colocación en molde; fundición y corte de la muestra, utilizando tamaño de partículas del agregado que pasan por la malla de abertura de 1.41 mm y retenido en 0.595 mm.

Para este procedimiento, se realizó la propuesta de fabricar tres muestras por cada proporción que se indica a continuación:

Diseño de mezcla de PET con basalto, de 90% de peso de PET y 10% de peso de basalto, 80% de peso de PET y 20% de peso de basalto, 70% de peso de PET y 30% de peso de basalto, 60% de peso de PET y 40% de peso de basalto, 50% de peso de PET y 50% de peso de basalto, 40% de peso de PET y 60% de peso de basalto, 30% de peso de PET y 70% de peso de basalto,

20% de peso de PET y 80% de peso de basalto, 10% de peso de PET y 90% de peso de basalto.

Se realizó la mezcla de cada una de las proporciones anteriormente indicadas, en contenedores de plástico (botellas) y posteriormente se vertió el material, en un molde metálico con dimensiones internas de 200 mm x 100 mm x 180 mm, formando tres capas y compactando cada capa con un número mínimo de golpes propuesto de 50 para cada capa utilizando un pisón metálico.

El peso considerado para la mezcla de (90% - 10%) de PET y (10% - 90%) de basalto fue de 1,472 g.

Una vez saturado el molde con las mezclas de materiales compactados, se tomaron lecturas con el vernier de la cara superficial, para determinar la distancia (L_0) del peralte de inicio, antes de sufrir el proceso de la contracción; posterior a ello, se ingresó a la mufla a una temperatura de 280° C en un periodo de tiempo de 120 minutos propuestos para las mezclas de 90% de PET y 10% de basalto, 80% de PET y 20% de basalto, 70% de PET y 30% de basalto, 60% de PET y 40% de basalto, 50% de PET y 50% de basalto, 40% de PET y 60% de basalto, 30% de PET y 70% de basalto, 20% de PET y 80% de basalto y 10% de PET y 90% de basalto.

Concluido este proceso, se retiró el molde del horno y se dejó enfriar a temperatura ambiente en un tiempo de tres horas; transcurrido este periodo, se volvió a tomar lectura (L_1) con el vernier, la distancia de reducción del material con respecto al valor inicial (L_0) de su peralte, para su uso y cálculo de la contracción.

Se extrajo del molde el material obtenido y se realizó el corte de la cara superior con el objeto de obtener una forma simétrica obteniendo las dimensiones de 198 mm x 98 mm x 50 mm en promedio (ver figura 3.11).

Las muestras de 20% de peso de PET y 80% de peso de basalto, 10% de peso de PET y 90% de peso de basalto, no fueron posibles su sinterización con la metodología planteada.

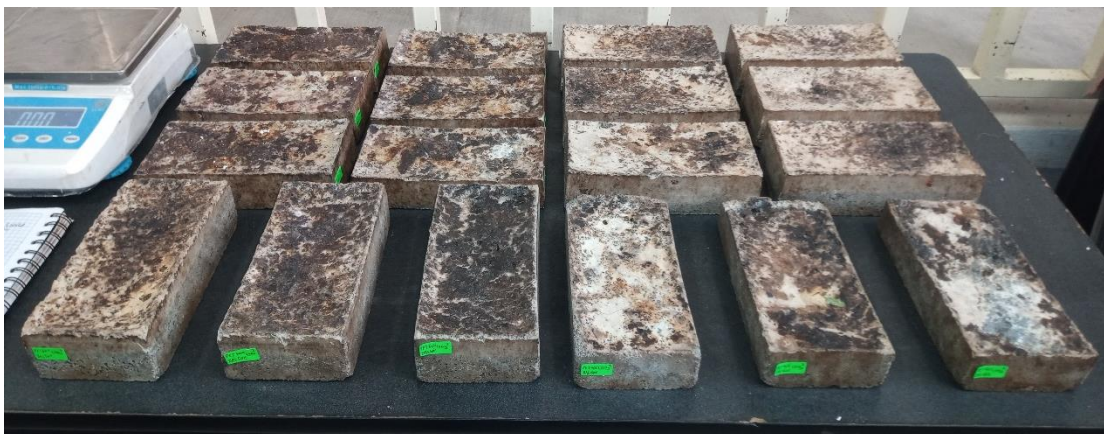


Figura 3.11.- Muestras obtenidas con diferentes composiciones PET – basalto, T = 280° C.
Fuente: elaboración propia.

3.14. Homogenización de mezclas PET-Fosfoyeso, colocación en molde; fundición y corte de la muestra, utilizando tamaño de partículas del agregado de 0.25 mm.

Para este procedimiento, se realizó la propuesta de fabricar tres muestras por cada proporción que se indica en lo siguiente:

Diseño de mezcla de PET con fosfoyeso; de 90% de peso de PET y 10% de peso de fosfoyeso; 80% de peso de PET y 20% de peso de fosfoyeso; 70% de peso de PET y 30% de peso de fosfoyeso; 60% de peso de PET y 40% de peso de fosfoyeso; 50% de peso de PET y 50% de peso de fosfoyeso; 40% de peso de PET y 60% de peso de fosfoyeso; 30% de peso de PET y 70% de

peso de fosfoyeso; 20% de peso de PET y 80% de peso de fosfoyeso y 10% de peso de PET y 90% de peso de fosfoyeso.

Se realizó la mezcla de cada una de las proporciones anteriormente indicadas, en contenedores de plástico (botellas) y posteriormente se vertió el material, en un molde metálico con dimensiones internas de 72 x 72 x 190 mm, formando tres capas y compactando cada capa con un número mínimo de golpes propuesto de 50 para cada capa utilizando un pisón metálico.

El peso considerado para la mezcla de (90% - 10%) de PET y (10% - 90%) de Fosfoyeso fue de 256 g.

Una vez saturado el molde con las mezclas de materiales compactados, se tomaron lecturas con el vernier de la cara superficial, para determinar la distancia (L_0) del peralte de inicio, antes de sufrir el proceso de la contracción; posterior a ello, se ingresó a la mufla a una temperatura de 280° C en un periodo de tiempo de 120 minutos propuestos para cada una de las mezclas de PET y Fosfoyeso.

Concluido este proceso, se dejó enfriar dentro de la mufla hasta llegar a temperatura ambiente y posteriormente se retiró el molde y se volvió a tomar lectura (L_1) con el vernier, la distancia de reducción del material con respecto al valor inicial (L_0) de su peralte, para su uso y cálculo de la contracción y se extrajo del molde el material obtenido y se realizó el corte de la cara superior con el objeto de obtener una forma simétrica obteniendo las dimensiones de 70 mm x 70 mm x 40 mm en promedio (*ver figura 3.12*).

Las muestras de 30% de peso de PET y 70% de peso de Fosfoyeso, 20% de peso de PET y 80% de peso de Fosfoyeso, 10% de peso de PET y 90% de

peso de Fosfoyeso, no fueron posibles su sinterización con la metodología planteada.

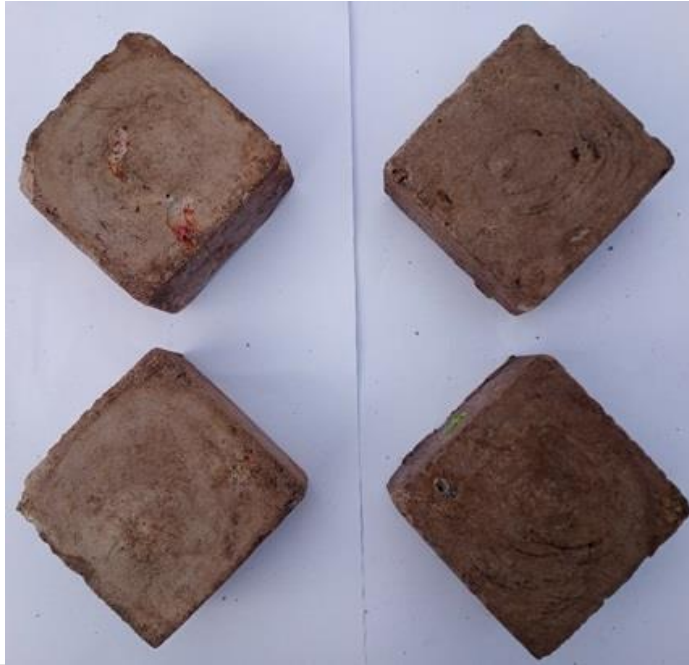


Figura 3.12.- Muestras obtenidas con diferentes composiciones PET-Fosfoyeso, T = 280° C.
Fuente: elaboración propia.

3.15. Homogenización de mezclas PET-MFCA, colocación en molde; fundición y corte de la muestra, utilizando tamaño de partículas del agregado que pasan por la malla de abertura de 9.53 mm y retenido en 0.595 mm.

Para este procedimiento, se realizó la propuesta de fabricar tres muestras por cada proporción que se indica en lo siguiente:

Diseño de mezcla de PET con MFCA; de 90% de peso de PET y 10% de peso de MFCA, 80% de peso de PET y 20% de peso de MFCA, 70% de peso de PET y 30% de peso de MFCA, 60% de peso de PET y 40% de peso de MFCA, 50% de peso de PET y 50% de peso de MFCA, 40% de peso de PET y 60%

de peso de MFCA, 30% de peso de PET y 70% de peso de MFCA, 20% de peso de PET y 80% de peso de MFCA y 10% de peso de PET y 90% de peso de MFCA.

Se realizó la mezcla de cada una de las proporciones anteriormente indicadas, en contenedores de plástico (botellas) y posteriormente se vertió el material, en un molde metálico con dimensiones internas de 200 x 100 x 180 mm, formando tres capas y compactando cada capa con un número mínimo de golpes propuesto de 50 para cada capa utilizando un pisón metálico.

El peso considerado para la mezcla de (90% - 10%) de PET y (10% - 90%) de MFCA fue de 1,472 g.

Una vez saturado el molde con las mezclas de materiales compactados, se tomaron lecturas con el vernier de la cara superficial, para determinar la distancia (L_0) del peralte de inicio, antes de sufrir el proceso de la contracción; posterior a ello, se ingresó a la mufla a una temperatura de 280° C en un periodo de tiempo de 120 minutos propuestos para cada una de las mezclas de PET y MFCA.

Concluido este proceso, el molde se retiró hasta que se encontrara la temperatura ambiente interna en el horno; transcurrido este periodo, se volvió a tomar lectura (L_1) con el vernier, la distancia de reducción del material con respecto al valor inicial (L_0) de su peralte, para su uso y cálculo de la contracción y se extrajo del molde el material obtenido y se realizó el corte de la cara superior con el objeto de obtener una forma simétrica obteniendo las dimensiones de 198 mm x 98 mm x 50 mm en promedio (*ver figura 3.13*).

Las muestras de 10% de peso de PET y 90% de peso de MFCA, no fueron posibles su sinterización con la metodología planteada.



Figura 3.13.- Muestras obtenidas con diferentes composiciones PET-MFCA, T = 280° C.
Fuente: elaboración propia.

3.16. Procedimiento para ejecutar las pruebas de resistencia a compresión de mezclas PET-Basalto, mezclas PET-Fosfoyeso y mezclas PET-MFCA.

Con las muestras obtenidas, se procedió a realizar las pruebas correspondientes de resistencia a la compresión, tomando como referencia, la norma NMX-C-083-ONNCCE-2014 Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes [76], donde se nos indica la metodología para realizar el ensayo correspondiente. Para este procedimiento se utilizaron muestras de dimensiones de 50 x 50 x 50 mm para mezclas PET-Basalto, muestras de dimensiones de 70 x 70 x 40 mm para mezclas PET-Fosfoyeso y muestras de dimensiones de 50 x 50 x 50 mm para mezclas PET-MFCA.

El procedimiento para realizar las pruebas a compresión fue el siguiente:

Previamente las muestras se les selecciono la cara más favorable para determinar su área donde recibirá el impacto de compresión. Teniendo el dato

del área se procedió a colocar sobre la base del equipo la muestra y se dio inicio con la compresión del material (*ver figura 3.14*). Una vez que la muestra ya no registra en el tabulador del equipo el incremento de carga y presentando su falla de corte, se procede a tomar la lectura de la fuerza interna obtenida (Kgf), dividiéndola con respecto al valor del área de contacto (cm²) de la muestra ensayada. Se realizaron 3 ensayos en el laboratorio para cada una de las proporciones de mezclas propuestas.

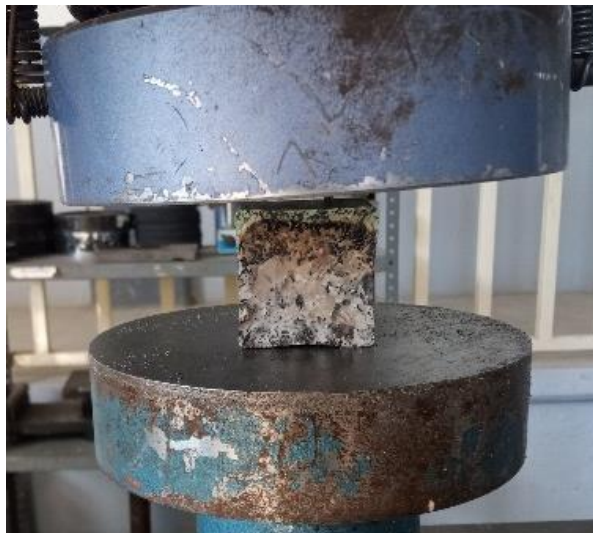


Figura 3.14.- Muestra colocada en prensa universal previa a ser sometida a esfuerzos.
Fuente: elaboración propia.

3.17. Procedimiento para ejecutar las pruebas de resistencia a flexión de mezclas PET-Basalto, mezclas PET-Fosfoyeso y mezclas PET-MFCA.

Con las muestras obtenidas, se procedió a realizar las pruebas correspondientes de resistencia a la flexión, tomando como referencia, la norma ASTM C1161-02c (Standard Test Method for Flexural Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature) [77], debido a que, en México, no es solicitada mediante alguna normativa este parámetro en los adoquines y/o tabiques, pero para lo siguiente se tomó con fines de investigación.

Para este procedimiento se utilizaron muestras de dimensiones de 198 x 98 x 50 mm para mezclas PET-Basalto, muestras de dimensiones de 70 x 70 x 40 mm para mezclas PET-Fosfoyeso y muestras de dimensiones de 198 x 98 x 50 mm para mezclas PET-MFCA.

El procedimiento para realizar las pruebas a flexión fue el siguiente:

Inicialmente la superficie de desgaste del adoquín debe quedar hacia arriba donde recibirá la carga al centro de este. En la parte inferior deberá contar con dos apoyos simples en cada uno de sus lados, debiendo estar perpendiculares al eje longitudinal del adoquín. Se procede a someterle carga hasta obtener su falla (*ver figura 3.15*) y se toma la lectura de la fuerza interna obtenida (Kgf). Se realizaron 3 ensayos en el laboratorio para cada una de las proporciones de mezclas propuestas.



Figura 3.15.- Prueba de flexión en adoquín.
Fuente: elaboración propia.

3.18. Procedimiento para ejecutar la prueba de deformación permanente por rodera con rueda cargada de Hamburgo para los adoquines de mezclas PET-Basalto.

Con las muestras obtenidas de fabricación de PET-basalto, se procedió a realizar las pruebas correspondientes de deformación permanente por rodera, tomando como referencia, la norma M-MMP-4-05-053/21 (Deformación permanente por rodera con rueda cargada de Hamburgo) [78], donde se nos indica la metodología para realizar el ensayo correspondiente.

Para este procedimiento se utilizaron 2 muestras con las proporciones de mezcla de 40% de peso en PET y 60% de peso en basalto y 2 muestras con las proporciones de mezcla de 30% de peso en PET y 70% de peso en basalto, con dimensiones circulares de 150 mm de diámetro y 50 mm de espesor cada una (*ver figura 3.16*).

Esta prueba consiste en llevar a cabo la medición de la deformación permanente por rodera de muestras de mezcla asfáltica en caliente compactada elaborada en laboratorio, provocada por el movimiento cíclico concentrado de una rueda metálica cargada.

Para éste caso el objetivo principal es identificar en los adoquines si son susceptibles al desgranamiento causado por la falta de adherencia entre el plástico PET y el basalto, así como simular el daño por rodera provocado por el paso continuo de los vehículos cargados.

Para esto es necesario utilizar la máquina de rueda cargada de Hamburgo, que es un dispositivo eléctrico capaz de mover una rueda de acero de 203 mm de diámetro y de 47 mm de ancho que se mueve sobre dos especímenes de prueba; la carga en la rueda es de 705 N. La rueda realiza 52 pasadas por

minuto con una velocidad máxima de 30.5 cm/s aproximadamente medido en el punto central del espécimen.

El sistema que sujete la rueda se detiene a las 20,000 pasadas o cuando la prueba haya alcanzado la mayor deformación permanente por rodera permitida que generalmente es de 10 mm.

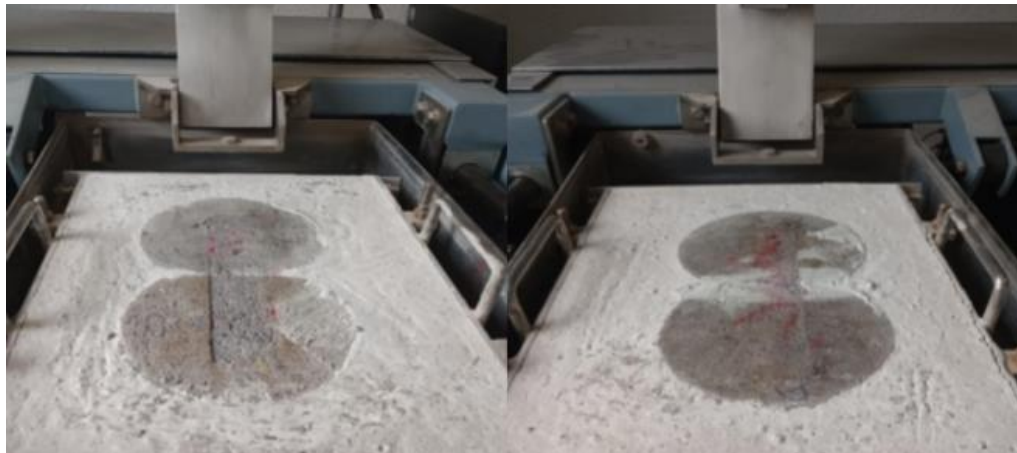


Figura 3.16.- Prueba de deformación permanente por rodera en adoquines.
Fuente: elaboración propia.

3.19. Procedimiento para realizar la prueba de absorción de mezclas PET-Basalto, mezclas PET-Fosfoyeso y mezclas PET-MFCA.

Con las muestras obtenidas, se llevó a cabo el procedimiento para obtener la prueba de absorción de cada una de las muestras tomando como referencia lo indicado en la norma NMX-C-314-ONNCCE-2014 Adoquines para uso en pavimentos - especificaciones y métodos de ensayo. [32].

Para este procedimiento se utilizaron muestras de dimensiones de 198 x 98 x 50 mm para mezclas PET-Basalto, muestras de dimensiones de 70 x 70 x 40 mm para mezclas PET-Fosfoyeso y muestras de dimensiones de 198 x 98 x 50 mm para mezclas PET-MFCA.

Inicialmente se obtuvieron los pesos de cada una de las muestras, posteriormente se sumergieron en agua en su totalidad cubriéndolas en un 100% de su volumen con respecto a sus dimensiones y se dejó reposar cada una de ellas en un lapso de 24 horas (*ver figura 3.17*).



Figura 3.17.- Prueba de absorción en adoquín.
Fuente: elaboración propia.

Transcurrido el tiempo se procedió a retirarlas del agua y con un paño seco, se procedió a retirar en cada una de sus caras, el excedente de agua que se encontrara, inmediatamente después de realizar el secado, se procedió a tomar lectura del peso de la muestra. Con los datos obtenidos, se procedió a realizar el cálculo de la absorción de cada una de las mismas.

3.20. Procedimiento para realizar la prueba de dilatometría en mezclas PET-Basalto, mezclas PET-Fosfoyeso y mezclas PET-MFCA.

Con las muestras obtenidas, se procedió a realizar las pruebas correspondientes de dilatometría, tomando como referencia, la norma M-MMP-4-05-007/00 (punto de inflamación Cleveland en cementos asfálticos) [79], que en su inciso F.4. nos indica que la muestra de cemento asfáltico será sometida al calor a una temperatura inicial de 14 a 17° C/min, hasta que alcance la temperatura aproximada de 60° C abajo del punto de inflamación probable de

la mezcla asfáltica; el incremento de la temperatura debe ser de 5 a 6° C/min. Así mismo el PET tiene una resistencia al calor entre 80° a 120° C (Richardson et al., 2000) [80].

Por lo anteriormente indicado, se tomó la propuesta de someter las muestras a la temperatura de 70° C en la mufla en un tiempo de una hora para cada una de las mismas (*ver figura 3.18*), tomando inicialmente sus medidas longitudinales y espesores previo al inicio del proceso térmico y al final del transcurso del tiempo establecido. Con los datos obtenidos, se procedió a realizar el cálculo de la dilatometría de cada una de las mismas.



Figura 3.18.- Prueba de dilatometría en adoquín.
Fuente: elaboración propia.

Para este procedimiento se utilizaron muestras de dimensiones de 198 x 98 x 50 mm para mezclas PET-Basalto, muestras de dimensiones de 70 x 70 x 40 mm para mezclas PET-Fosfoyeso y muestras de dimensiones de 198 x 98 x 50 mm para mezclas PET-MFCA.

3.21. Procedimiento para elaborar mezcla de adherencia para los adoquines de composición PET – Basalto a base de Cemento – Arena Silica – Agua.

Para la ejecución de este proceso, se usó el Cemento Portland, Arena Silica y Agua con relación de 35% - 45% - 20% con respecto a su peso de los materiales.

Se inició con el proceso de mezclado de materiales del Cemento Portland y Arena Silica, posteriormente se adicionó el Agua revolviéndolos nuevamente hasta lograr una mezcla homogénea.

Una vez elaborada la mezcla se colocó de manera extendida sobre los adoquines (*ver figura 3.19*) que en este caso eran pedazos resultantes de los esfuerzos obtenidos por las pruebas de flexión, hasta que se obtuvo un espesor de ± 10 mm para a su adherencia según lo indicado en la norma N-CTR-CAR-1-02-002-20 (Zampeado) [81].



Figura 3.19.- Mezcla a base de Cemento – Arena Silica – Agua para adherencia en adoquines.
Fuente: elaboración propia.

3.22. Procedimiento para realizar la prueba de absorción en mezcla de adherencia para los adoquines de composición PET – Basalto a base de Cemento – Arena Silica – Agua.

Con el material sobrante de la mezcla de adherencia, se obtuvieron 3 muestras de dimensiones de 20 mm x 40 mm x 10 mm, se llevó a cabo el procedimiento para obtener la absorción de cada una de las muestras tomando como referencia lo indicado en la norma NMX-C-314-ONNCCE-2014 (Adoquines para uso en pavimentos - especificaciones y métodos de ensayo) [32].

Inicialmente se obtuvieron los pesos de cada una de las muestras, posteriormente se sumergieron en agua en su totalidad cubriéndolas en un 100% de su volumen con respecto a sus dimensiones y se dejó reposar cada una de ellas en un lapso de 24 horas (*ver figura 3.20*).



Figura 3.20.- Prueba de absorción en mezcla de adherencia.
Fuente: elaboración propia.

Transcurrido el tiempo se procedió a retirarlas del agua y con un paño seco, se procedió a retirar en cada una de sus caras, el excedente de agua que se encontrara, inmediatamente después de realizar el secado, se procedió a tomar lectura del peso de la muestra. Con los datos obtenidos, se procedió a realizar el cálculo de la absorción de cada una de las mismas.

Capítulo 4. Resultados y discusión.

4.1. Contracción lineal en mezclas PET-Basalto, mezclas PET-Fosfoyeso y mezclas PET-MFCA.

Para el cálculo de la contracción del material se utilizó la fórmula de la ecuación 1. y que a continuación se indica:

$$\Delta L = \frac{L_0 - L_1}{L_0} \times 100, \% \dots\dots\dots \text{Ecuación 1.}$$

Donde:

ΔL = Contracción lineal, %

L_0 = Longitud inicial, mm

L_1 = Longitud final, mm

En la figura 4.1, se ilustran los resultados obtenidos del valor de contracción lineal de las 7 composiciones de mezclas PET-Basalto.

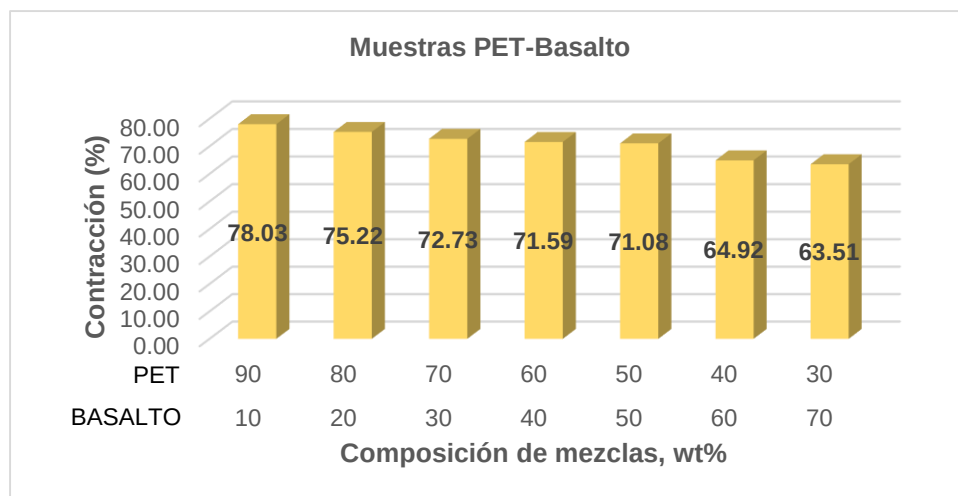


Figura 4.1.- Cambio en la contracción de las muestras según la composición de las mezclas de PET - basalto. Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con lo observado en la figura 4.1. se aprecia una contracción lineal del 78.03% al 63.51% de las mezclas PET-Basalto despues de ser sometidas al proceso térmico.

En la figura 4.2, se ilustra los resultados obtenidos del valor de contracción lineal de las 6 composiciones de mezclas PET-Fosfoyeso.

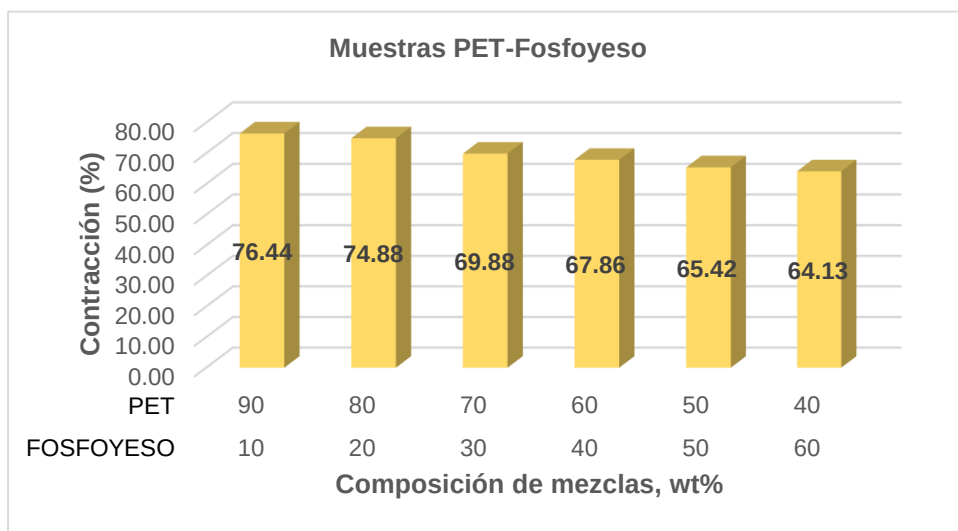


Figura 4.2.- Cambio en la contracción de las muestras según la composición de las mezclas de PET - Fosfoyeso. Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con lo observado en la figura 4.2. se aprecia una contracción lineal del 76.44% al 64.13% de las mezclas PET-Fosfoyeso despues de ser sometidas al proceso térmico.

En la figura 4.3, se ilustra los resultados obtenidos del valor de contracción lineal de las 8 composiciones de mezclas PET-MFCA.

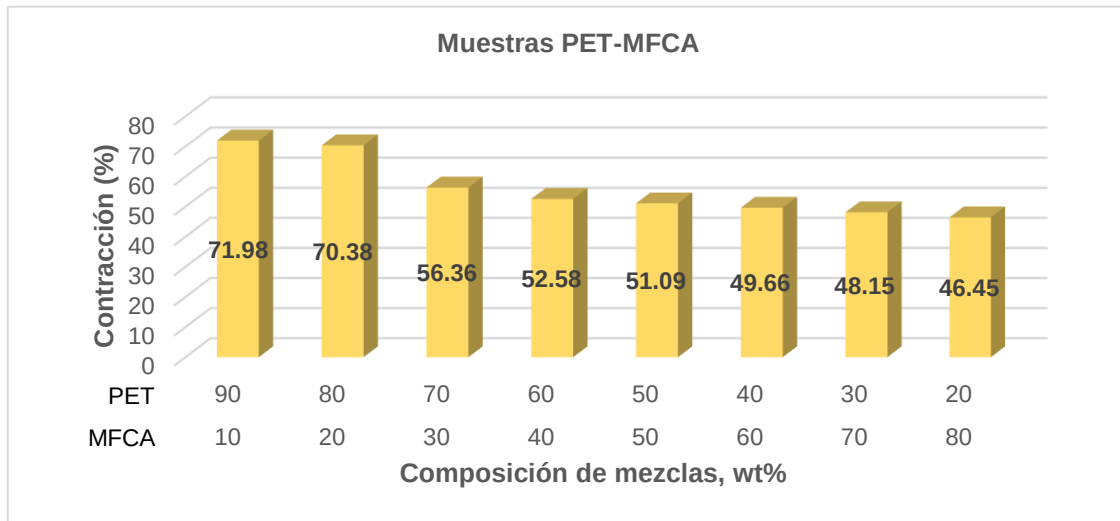


Figura 4.3.- Cambio en la contracción de las muestras según la composición de las mezclas de PET - MFCA. Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con lo observado en la figura 4.3. se aprecia una contracción lineal del 71.98% al 46.45% de las mezclas PET-MFCA después de ser sometidas al proceso térmico.

4.2. Resistencia a la compresión en mezclas PET-Basalto, mezclas PET-Fosfoyeso y mezclas PET-MFCA.

Para el cálculo de la resistencia de los materiales se utilizó la fórmula de la ecuación 2. y que a continuación se indica:

$$\sigma = \frac{F}{A} \dots\dots\dots \text{Ecuación 2.}$$

Donde:

σ = Esfuerzo en un cuerpo, MPa

F = Fuerza interna de compresión, N

A = Área de la cara del cuerpo, mm²

En la figura 4.4, se ilustran los resultados obtenidos del valor de resistencia a compresión de las 7 composiciones de mezclas PET-Basalto.

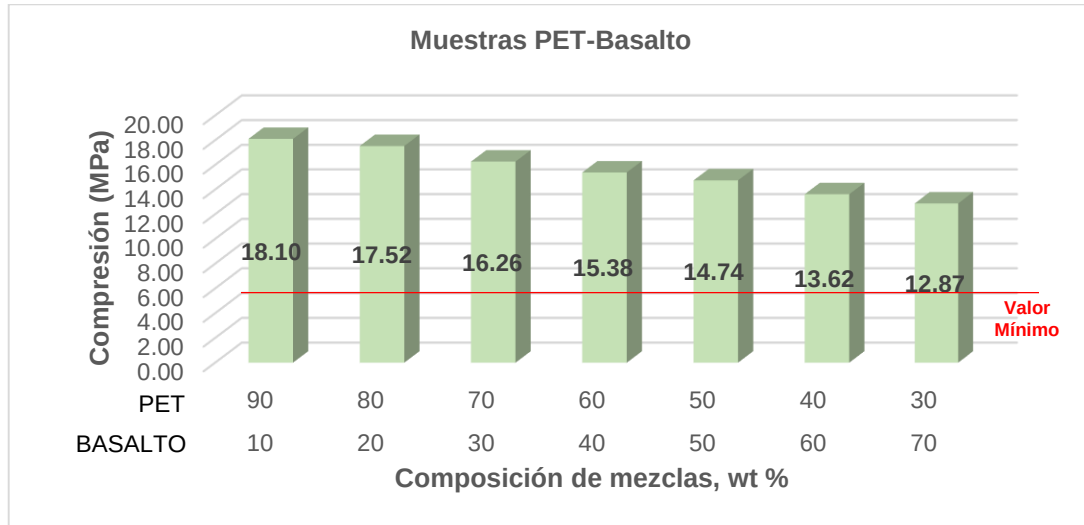


Figura 4.4.- Compresión de las muestras según la composición de las mezclas de PET - basalto.
Fuente: elaboración propia.

En la gráfica ilustrada en la figura 4.4., se aprecia un valor máximo de compresión de 18.10 MPa y que va en tendencia de disminución hasta llegar al valor mínimo de 12.87 MPa, esto en función de las proporciones de las mezclas PET-Basalto.

En la figura 4.5, se ilustra los resultados obtenidos del valor de resistencia a compresión de las 6 composiciones de mezclas PET-Fosfoyeso.

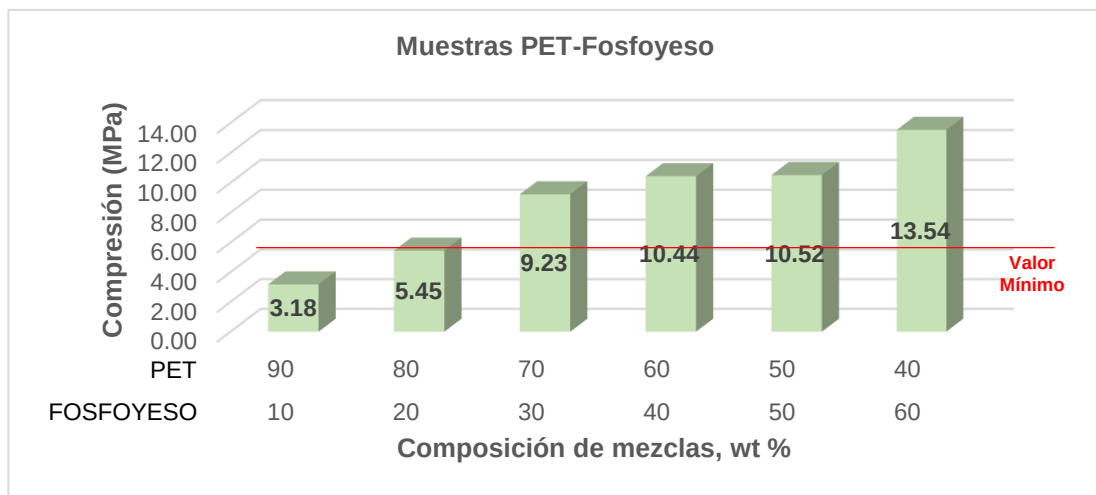


Figura 4.5.- Compresión de las muestras según la composición de las mezclas de PET - Fosfoyeso.
Fuente: elaboración propia.

En la gráfica ilustrada en la figura 4.5., se aprecia un valor mínimo de compresión de 3.18 MPa y que va en tendencia de aumento hasta llegar al valor máximo de 13.54 MPa, esto en función de las proporciones de las mezclas PET-Fosfoyeso.

En la figura 4.6, se ilustra los resultados obtenidos del valor de resistencia a compresión de las 8 composiciones de mezclas PET-MFCA.

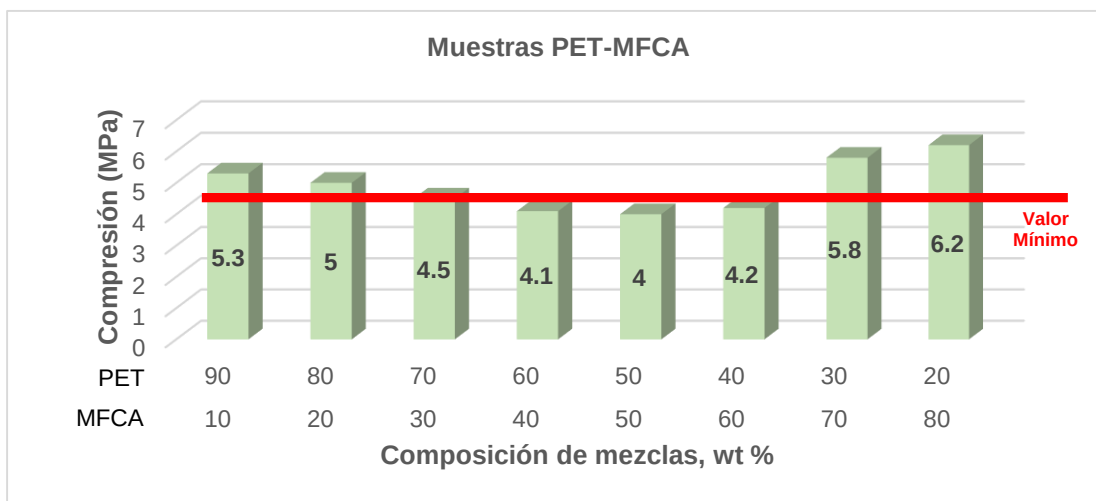


Figura 4.6.- Compresión de las muestras según la composición de las mezclas de PET - MFCA.
Fuente: elaboración propia.

En la gráfica ilustrada en la figura 4.6., se aprecia un valor inicial de compresión de 5.3 MPa y que va en tendencia de disminución hasta llegar al valor mínimo de 4 MPa, posterior a ello, vuelve a incrementar el valor hasta llegar a un máximo de 6.2 MPa, esto en función de las proporciones de las mezclas PET-MFCA.

4.3. Resistencia a la flexión en mezclas PET-Basalto, mezclas PET-Fosfoyeso y mezclas PET-MFCA.

Para el cálculo de la flexión de las muestras se utilizó la fórmula de la ecuación 3. y que a continuación se indica:

$$M_r = \frac{3CL}{2ae^2} \dots \dots \dots \text{Ecuación 3.}$$

Donde:

- M_r = Módulo de rotura a la flexión, MPa
- C = Carga máxima de rotura, N
- L = Longitud entre apoyos inferiores, mm
- a = Ancho del espécimen, mm
- e = Espesor del espécimen, mm

En la figura 4.7, se ilustran los resultados obtenidos del valor de flexión de las 7 composiciones de mezclas PET-Basalto.

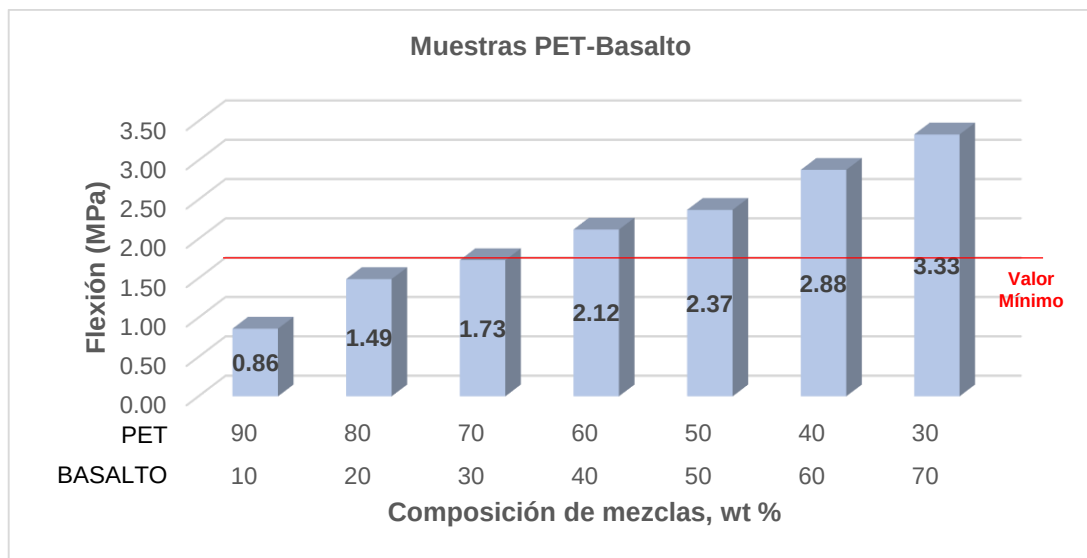


Figura 4.7.- Flexión de las muestras según la composición de las mezclas de PET - basalto.
Fuente: elaboración propia.

En la gráfica ilustrada en la figura 4.7., se aprecia un valor mínimo de flexión de 0.86 MPa y que va en tendencia de aumento hasta llegar al valor máximo de 3.33 MPa, esto en función de las proporciones de las mezclas PET-Basalto.

En la figura 4.8, se ilustra los resultados obtenidos del valor de flexión de las 6 composiciones de mezclas PET-Fosfoyeso.

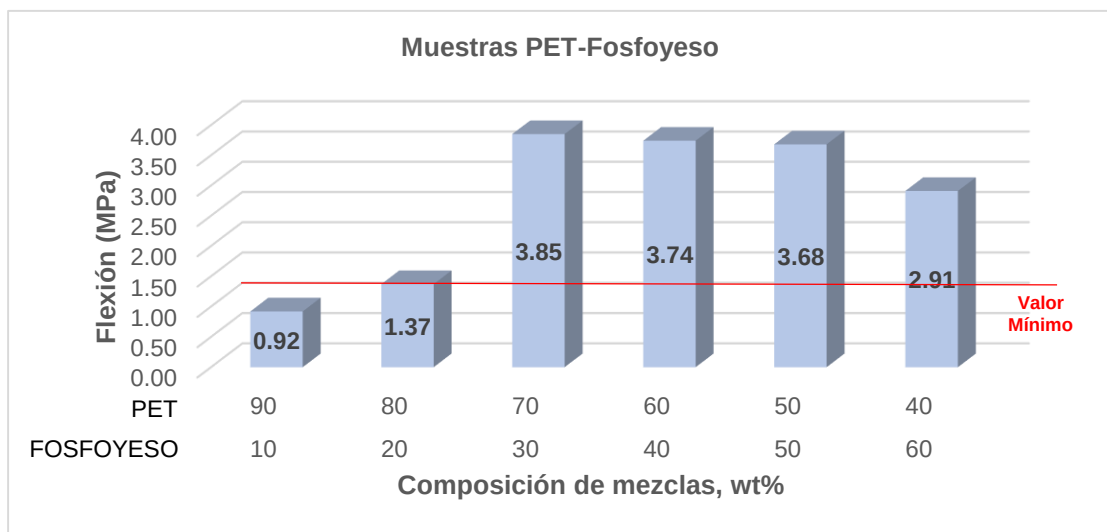


Figura 4.8.- Flexión de las muestras según la composición de las mezclas de PET - Fosfoyeso.
Fuente: elaboración propia.

En la gráfica ilustrada en la figura 4.8., se aprecia un valor inicial de flexión de 0.92 MPa y que va en tendencia de aumento hasta llegar al valor máximo de 3.85 MPa, posterior a ello, vuelve a disminuir el valor hasta llegar a 2.91 MPa, esto en función de las proporciones de las mezclas PET-Fosfoyeso.

En la figura 4.9, se ilustra los resultados obtenidos del valor de flexión de las 8 composiciones de mezclas PET-MFCA.

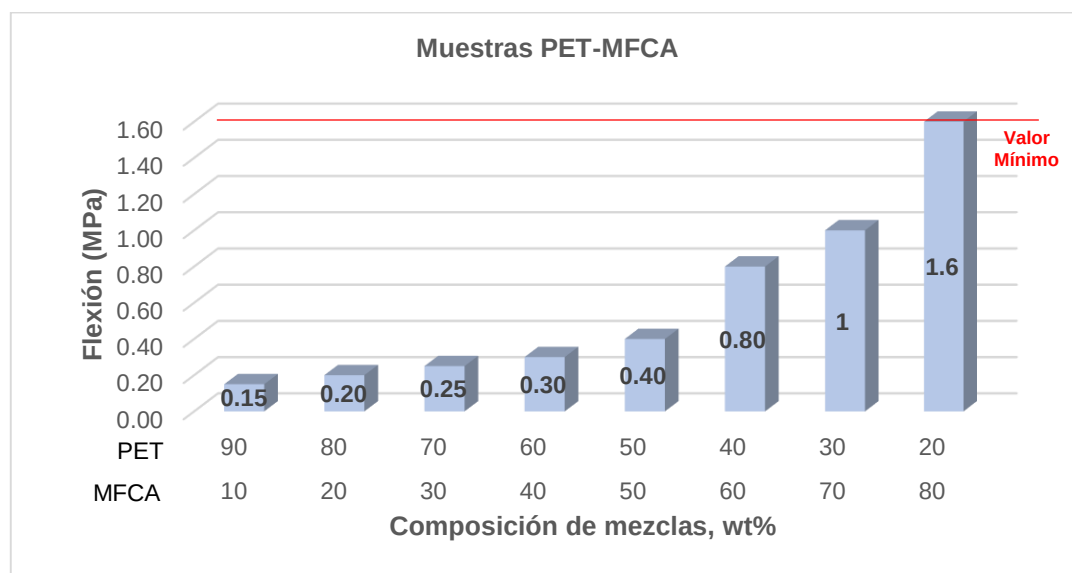


Figura 4.9.- Flexión de las muestras según la composición de las mezclas de PET - MFCA.
Fuente: elaboración propia.

En la gráfica ilustrada en la figura 4.9., se aprecia un valor mínimo de flexión de 0.15 MPa y que va en tendencia de aumento hasta llegar al valor máximo de 1.6 MPa, esto en función de las proporciones de las mezclas PET-MFCA.

4.4. Deformación por rodera en mezclas PET-Basalto.

Para determinar la deformación en una estructura de pavimento, que en este caso el material obtenido, será utilizarlo en la primera capa de la misma; se optó por realizar la prueba correspondiente que se aplica con la metodología

indicada en el Protocolo AMAAC, y que se rige por la norma M-MMP-4-05-053/21 (Deformación permanente por rodera con rueda cargada de Hamburgo) [78], ilustrando los valores obtenidos de la prueba correspondiente en la figura 4.10.

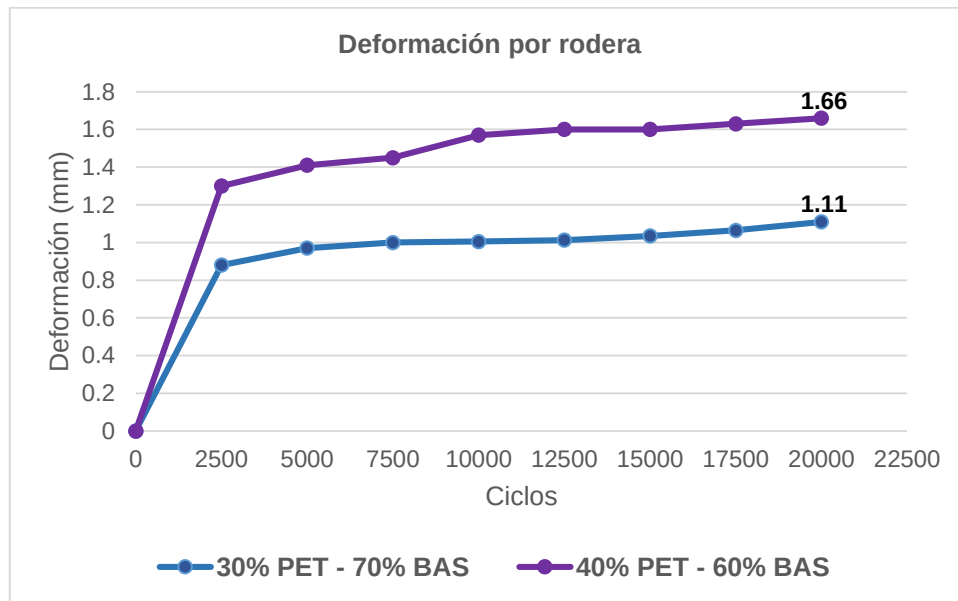


Figura 4.10.- Deformación de las muestras según la composición de las mezclas de PET - basalto. Fuente: elaboración propia.

En la gráfica ilustrada en la figura 4.10., se aprecian los valores mínimos de deformación de 0.88 mm y 1.3 mm a 2,500 ciclos y que ambos, van en tendencia de aumento hasta llegar a los valores máximos de 1.11 mm y 1.66 mm a 20,000 ciclos respectivamente, esto en función de las proporciones de las mezclas PET-Basalto indicadas.

4.5. Absorción en mezclas PET-Basalto, mezclas PET-Fosfoyeso y mezclas PET-MFCA.

Para el cálculo de la absorción del material, se utilizó la fórmula de la ecuación 4 y que a continuación se indica:

$$A = \frac{M - D}{D} \times 100, \% \dots\dots\dots \text{Ecuación 4}$$

Donde:

A = Absorción, %

D = Peso de la masa de la muestra seca, g

M = Peso de la masa de la muestra saturada en agua, g

En la figura 4.11, se ilustra los resultados obtenidos del valor de absorción de las 7 composiciones de mezclas PET-Basalto.

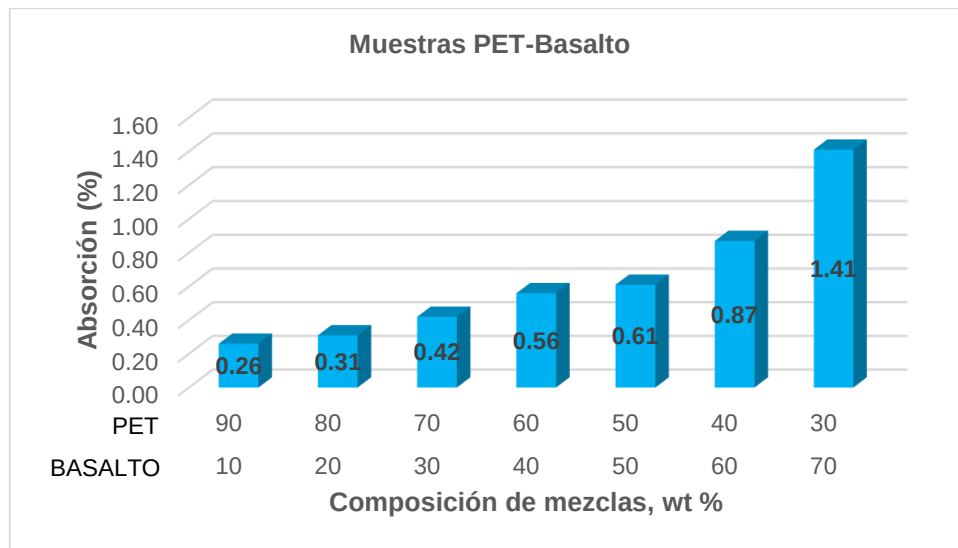


Figura 4.11.- Absorción de las muestras según la composición de las mezclas de PET - basalto. Fuente: elaboración propia.

En la gráfica ilustrada en la figura 4.11., se aprecia un valor mínimo de absorción de 0.26% y que va en tendencia de aumento hasta llegar al valor máximo de 1.41%, esto en función de las proporciones de las mezclas PET-Basalto.

En la figura 4.12, se ilustra los resultados obtenidos del valor de absorción de las 6 composiciones de mezclas PET-Fosfoyeso.

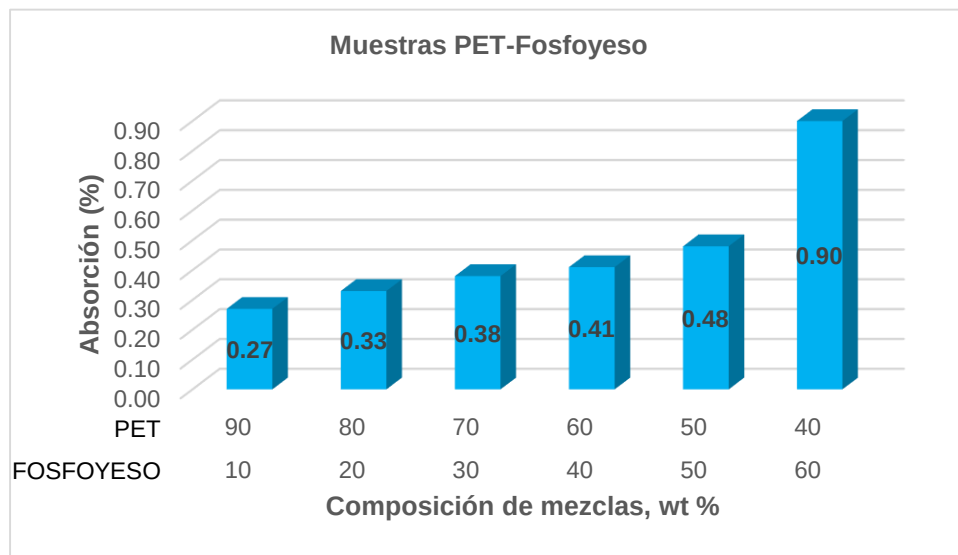


Figura 4.12.- Absorción de las muestras según la composición de las mezclas de PET - Fosfoyeso. Fuente: elaboración propia.

En la gráfica ilustrada en la figura 4.12., se aprecia un valor mínimo de absorción de 0.27% y que va en tendencia de aumento hasta llegar al valor máximo de 0.90%, esto en función de las proporciones de las mezclas PET-Fosfoyeso.

En la figura 4.13, se ilustra los resultados obtenidos del valor de absorción de las 8 composiciones de mezclas PET-MFCA.

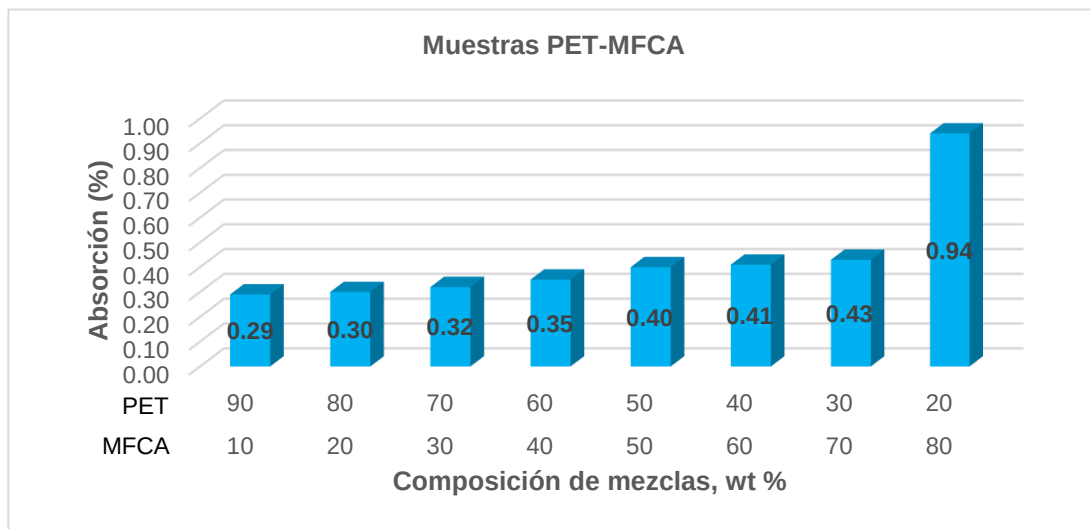


Figura 4.13.- Absorción de las muestras según la composición de las mezclas de PET - MFCA.
Fuente: elaboración propia.

En la gráfica ilustrada en la figura 4.13., se aprecia un valor mínimo de absorción de 0.29% y que va en tendencia de aumento hasta llegar al valor máximo de 0.94%, esto en función de las proporciones de las mezclas PET-MFCA.

4.6. Dilatometría en mezclas PET-Basalto, mezclas PET-Fosfoyeso y mezclas PET-MFCA.

Con respecto a las pruebas efectuadas de dilatometría en mezclas PET-basalto, PET-Fosfoyeso y PET- MFCA, no se obtuvo incremento de tamaño en cada una de las muestras sometidas al proceso térmico de 70°C durante un periodo de una hora.

4.7. Adherencia de mezcla a base de Cemento – Arena Silica – Agua.

Con respecto a la fabricación de la mezcla a base de Cemento – Arena Silica – Agua, se logró obtener la adherencia entre las juntas y fallas de corte de los adoquines propuestos con mezclas PET-Basalto (*ver figura 4.14*).



Figura 4.14.- Adherencia de la mezcla a base de Cemento – Arena Silica – Agua
Fuente: elaboración propia.

4.8. Absorción en mezcla de adherencia a base de Cemento – Arena Silica – Agua.

En la figura 4.15, se ilustra los resultados obtenidos del valor de absorción de las 3 muestras del diseño de mezclas Cemento - Arena Silica - Agua (mortero).

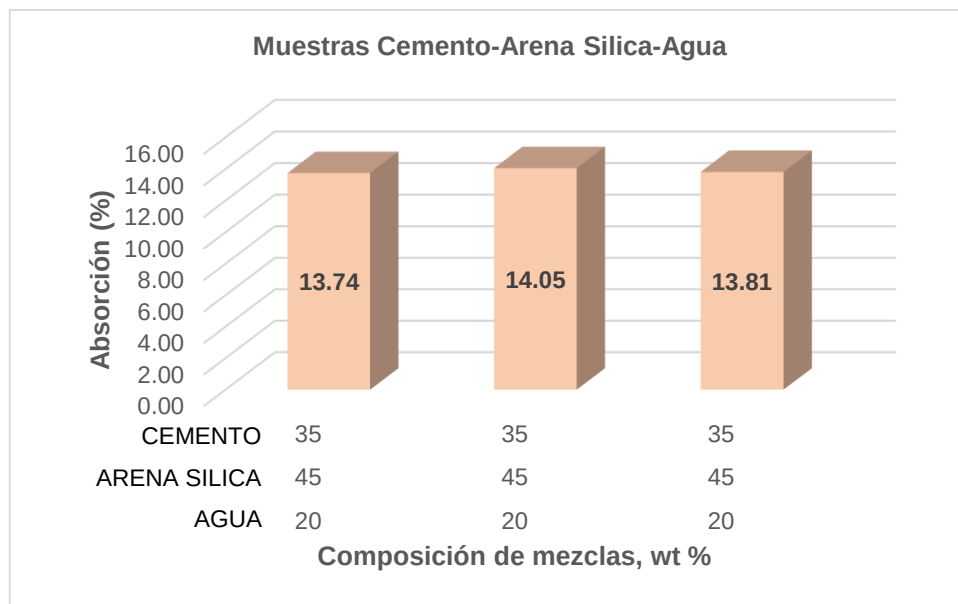


Figura 4.15.- Absorción de las muestras según la composición de la mezcla de Cemento-Arena Silica-Agua. Fuente: elaboración propia.

En la gráfica ilustrada en la figura 4.15., se aprecia un valor inicial de absorción de 13.74% y que va en tendencia de aumento hasta llegar al valor máximo de 14.05%, posterior a ello, vuelve a disminuir el valor hasta llegar a 13.81%, esto en función de las proporciones de las mezclas Cemento-Arena Silica-Agua.

Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones.

Se realizó la fabricación de adoquines y/o ladrillos, obteniendo la fusión de los materiales empleados, plástico PET proporciones (90 a 30) % - basalto proporciones (10 a 70) %, plástico PET proporciones (90 a 40) % - fosfoyeso proporciones (10 a 60) % y plástico PET proporciones (90 a 20) % - MFCA proporciones (10 a 80) % a la temperatura de 280°C.

En base a los resultados obtenidos de las mezclas de los materiales con plástico PET reciclado, considerando los valores de las pruebas físicas en el desarrollo de la tecnología para fabricación de adoquines se concluye lo siguiente:

Para las muestras de mezclas de basalto con tamaño de partículas de 0.595 mm y con plástico PET reciclado con tamaño de partículas de 4.75 mm a 19.05 mm, en proporciones de (70 a 30) % de plástico PET reciclado - (30 a 70) % basalto, cumplen con los valores mínimos de resistencia a la compresión (4 MPa), flexión (1.5 MPa), absorción (5%) y dilatometría (60° C), de acuerdo con la normativa aplicada para esta investigación, por lo que los materiales adquiridos son recomendables para su uso y aplicación en la construcción.

Para las muestras de mezclas de basalto y PET reciclado con tamaño de partículas anteriormente indicadas, en proporciones de (40 a 30) % de plástico PET reciclado - (30 a 40) % basalto, cumplen con el valor máximo normativo (10 mm) para la deformación por rodera aplicada para la primera capa estructural de una superficie de rodamiento.

Para las muestras de mezclas de fosfoyeso con tamaño de partículas de 0.25 mm y con plástico PET reciclado con tamaño de partículas de 4.75 mm a 19.05 mm, en proporciones de (70 a 40) % de plástico PET reciclado - (30 a 60) %

fosfoyeso, cumplen con los valores mínimos de resistencia a la compresión (4 MPa), flexión (1.5 MPa), absorción (5%) y dilatometría (60° C), de acuerdo con la normativa aplicada para esta investigación, por lo que los materiales adquiridos son recomendables para su uso y aplicación en la construcción.

Para las muestras de mezclas de material de fresado de carpeta asfáltica con tamaño de partículas de de 9.53 mm a 0.595 mm y con plástico PET reciclado con tamaño de partículas de 4.75 mm a 19.05 mm, en proporciones de (20) % de plástico PET reciclado - (80) % material de fresado de carpeta asfáltica, cumplen con los valores mínimos de resistencia a la compresión (4 MPa), flexión (1.5 MPa), absorción (5%) y dilatometría (60° C), de acuerdo con la normativa aplicada para esta investigación, por lo que el material adquirido es recomendable para su uso y aplicación en la construcción.

Para la muestra de mezcla ligante para los adoquines compuesta con cemento – arena silica – agua, cumple con el valor mínimo de absorción (15%), de acuerdo con la normativa aplicada para esta investigación, por lo que el material adquirido es recomendable para su uso y aplicación en la unión de los adoquines obtenidos.

Las mejores mezclas para la fabricación de los bloques son las siguientes:

- 70% de plástico PET - 30% Basalto
- 60% de plástico PET - 40% Basalto
- 50% de plástico PET - 50% Basalto
- 40% de plástico PET - 60% Basalto
- 30% de plástico PET - 70% Basalto
- 70% de plástico PET - 30% Fosfoyeso
- 60% de plástico PET - 40% Fosfoyeso
- 50% de plástico PET - 50% Fosfoyeso

- 40% de plástico PET - 60% Fosfoyeso
- 20% de plástico PET - 80% MFCA

Se hacen las recomendaciones para futuras investigaciones realizar la fabricación de mezclas con las siguientes proporciones:

- (39% a 31%) de plástico PET – (61% a 69%) de Basalto
- (29% a 20%) de plástico PET – (71% a 80%) de Basalto
- (49% a 41%) de plástico PET – (51% a 59%) de Fosfoyeso
- (39% a 30%) de plástico PET – (61% a 70%) de Fosfoyeso
- (29% a 21%) de plástico PET – (71% a 79%) de MFCA
- (19% a 10%) de plástico PET – (81% a 90%) de MFCA

Esto con el objeto de identificar los valores de las pruebas físicas elaboradas en la presente investigación y poder tener mejores parámetros de elección de las mezclas ideales para su aplicación y fabricación.

Referencias.

- [1] <https://www.gob.mx/imt/acciones-y-programas/red-nacional-de-caminos>
- [2] López, A., Sánchez, J., & Gutiérrez, M. (2020). Aprovechamiento de residuos de construcción y demolición para la elaboración de materiales de construcción ecoeficientes. *Revista Ingeniería y Desarrollo*, 48(2), 123-136.
- [3] Vázquez, C., González, R., & Pérez, M. (2019). Desafíos en el moldeo de materiales para la construcción: una revisión de la literatura. *Revista de Investigación en Ingeniería Civil*, 14(2), 103-116.
- [4] Rodríguez, F., Vázquez, S., & Martínez, D. (2021). Evaluación del impacto ambiental del proceso de cocción de ladrillos en hornos tradicionales. *Revista de Ciencia y Tecnología Ambiental*, 8(2), 67-80.
- [5] <http://www.plasticbottlevillage-theline.com/es/historia-1>
- [6] González, A., Pérez, J., & López, M. (2020). Uso de PET reciclado en la fabricación de adoquines de concreto. *Revista de Ingeniería Civil Sostenible*, 5(2), 87-98.
- [7] López, R., Sánchez, P., & Martínez, E. (2021). Aplicación de basalto reciclado en la producción de ladrillos cerámicos. *Revista de Materiales de Construcción Sostenibles*, 8(1), 45-58.
- [8] Martínez, M., González, L., & Pérez, A. (2019). Potencial de reutilización de fosfoyeso en la construcción de carreteras. *Revista de Investigación en Ingeniería Ambiental*, 14(2), 103-116.
- [9] Byung, W., Seung, K., Cheol, K. Mechanical properties of polyester polymer concrete using recycled polyethylene terephthalate. *ACI Structural Journal*, 103(2), Pp. 219 - 225. (2006).
- [10] Pastor, C. A., Salazar, O. J., Seminario, R. O., Tineo, C. A., Zapata, V. J. Diseño de planta productora de adoquines a base de cemento y plástico reciclado. Universidad de Piura. (2015).

- [11] Echeverría E.R., Ladrillos de concreto con plástico PET reciclado, Universidad Nacional de Cajamarca, Facultad de ingeniería, Cajamarca Perú, (2017).
- [12] Akinwumi I.I., Ayebaemi H., Domo-Spiff, Adeniyi S., Marine plastic pollution and affordable housing challenge: Shredded waste plastic stabilized soil for producing compressed earth bricks. - Case Studies in Construction Materials, 11, e00241, (2019).
- [13] Aneke F.I., Shabangu C., Green-efficient masonry bricks produced from scrap plastic waste and foundry sand. - Case Studies in Construction Materials, 14, e00515, (2021).
- [14] Ikechukwu A.F., Shabangu C., Strength and durability performance of masonry bricks produced with crushed glass and melted PET plastics. - Case Studies in Construction Materials, 14, e00542, (2021).
- [15] Flores V., Rodríguez M., Romero I., Esquivias L., Caracterización de morteros mixtos de cal obtenida del reciclado de fosfoyeso. – Cerámica y Vidrio, 59, 129-136, (2020).
- [16] Xuemei C., Yuanzheng L., Qihongwu., Yi D., Qing Yuan W., Wenjie T., Baiyu Z., Estudio de las características físicas y químicas del fosfoyeso β -hemihidrato, 17, e01461, (2022).
- [17] Colmillo D., Jian Y., Yanling L., Tianxiao Z., Yishun L., Shengwen T., Influencia del cemento en las propiedades de los materiales cementicios compuestos a base de fosfoyeso calcinado. – Journal of Materials Research and Technology, 24, 3145-3156, (2023).
- [18] Murali G., Azab M., Investigaciones recientes en la utilización de fosfoyeso como materiales de construcción: Revisión. – Journal of Materials Research and Technology, 25, 960-987, (2023).
- [19] Sheng Z., Zhou J., Shu Z., Yakubu Y., Chen Y., Wang W., Wang Y., Baldosas cerámicas no cocidas reforzadas con bigotes de sulfato de calcio preparadas a partir de yeso fosforado – Cerámica y Vidrio, 57, 73-78, (2018).

- [20] Flores-Alés V., Rodríguez M., Romero I., Esquivias L., Caracterización de morteros mixtos de cal obtenida del reciclado de fosfoyeso, – Cerámica y Vidrio, 59, 129-136, (2020).
- [21] Pereira V., Geraldo R., Cruz T., Camarini G., Valorización de subproductos industriales: Reciclaje de fosfoyeso como material aglomerante ecológico. – Ingeniería y tecnología más limpias, 5, 100310, (2021).
- [22] Xuemei C., Yuanzheng L., Qihongwu., Yi D., Qing Yuan W., Wenjie T., Baiyu Z., Estudio de las características físicas y químicas del fosfoyeso β -hemihidrato – Estudios de caso en materiales de construcción, 17, e01461, (2022).
- [23] Deng F., Ye J., Liu Y., Zhang T., Liao Y., Tang S., Influencia del cemento en las propiedades de los materiales cementosos compuestos a base de yeso fosforado calcinado – Revista de Investigación y Tecnología de Materiales, 24, 3145-3156, (2023).
- [24] Instituto Mexicano del Transporte, N-CMT-2-01-001/02 Ladrillos y bloques cerámicos, Normativa para la Infraestructura del Transporte, Secretaría de comunicaciones y transportes, Pedro Escobedo, Querétaro, 2002.
- [25] <https://arteplastica.es/el-plastico-pet-para-que-se-usa/>
- [26] Sughanthy S.A.P., Ansari M.N.M., Atiqah A., Dynamic mechanical analysis of polyethylene terephthalate/hydroxyapatite biocomposites for tissue engineering applications, Journal of Materials Research and Technology, Malaysia, 2020.
- [27] <https://dle.rae.es/basalto>
- [28] Rodríguez A. R., Del Castillo H., La ingeniería de suelos en las vías terrestres carreteras, ferrocarriles y aeropistas volumen 1, primera edición ed. Limusa, México D.F., 1977.
- [29] Y. Chernysh, O. Yakhnenko, V. Chubur, H. Roubík, (2021) Reciclaje de fosfoyeso: una revisión de problemas ambientales, tendencias actuales y perspectivas. aplicación ciencia 11(4), 1575.

- [30] Instituto Mexicano del Transporte, N-CSV-CAR-3-02-006-20 Fresado de la superficie de rodadura en pavimentos asfálticos, Normativa para la Infraestructura del Transporte, Secretaría de comunicaciones y transportes, Ciudad de México, (2020).
- [31] <https://dle.rae.es/mortero>
- [32] Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, NMX-C-314-ONNCCE-2014 Adoquines para uso en pavimentos, Norma Mexicana, Diario Oficial de la Federación, Benito Juárez, Ciudad de México, 2014.
- [33] Rodríguez, F., Sánchez, J., & Martínez, D. (2021). Durabilidad del PET en condiciones de exposición a la intemperie: estudio experimental. *Revista de Ciencia y Tecnología Ambiental*, 8(2), 87-102.
- [34] López, R., Sánchez, P., & Martínez, E. (2020). Aplicaciones del PET reciclado en la construcción: una revisión de la literatura. *Revista de Materiales de Construcción Sostenibles*, 7(1), 29-42.
- [35] García, A., Pérez, M., & Rodríguez, J. (2019). Propiedades mecánicas del Tereftalato de Polietileno (PET) y su aplicación en la construcción. *Revista de Ingeniería Civil Sostenible*, 4(2), 67-80.
- [36] Martínez, J., García, L., & Pérez, A. (2022). Resistencia a la corrosión del PET en ambientes marinos: estudio experimental. *Revista de Ingeniería y Tecnología*, 10(1), 103-116.
- [37] Pérez, A., Rodríguez, M., & Fernández, P. (2018). Reciclabilidad del PET y su potencial como material de construcción: una revisión. *Revista de Ingeniería Ambiental*, 13(2), 45-58.
- [38] Richardson, Lokensgard, *Industria del Plástico*, primera edición ed. Paraninfo S.A., Madrid España, 1999.
- [39] A.K. Van Der Vegt, L.E. Govaert, *Polymeren*, quinta edición ed. Dup Blue, Delft Holanda, 2003.

- [40] García, R., López, A., & Martínez, J. (2021). Composición química del basalto y su influencia en las propiedades físicas. *Revista de Ciencia y Tecnología de los Materiales*, 10(2), 87-98.
- [41] López, M., Sánchez, P., & Pérez, J. (2022). Propiedades mecánicas del basalto y su aplicación en la construcción. *Revista de Ingeniería Civil Sostenible*, 7(1), 45-58.
- [42] Martínez, E., Rodríguez, A., & García, L. (2020). Resistencia al desgaste del basalto en aplicaciones de pavimentación: estudio experimental. *Revista de Ingeniería de Materiales*, 5(2), 103-116.
- [43] Pérez, A., González, M., & López, R. (2019). Estabilidad dimensional del basalto en condiciones ambientales adversas. *Revista de Investigación en Ingeniería Civil*, 14(1), 29-42.
- [44] Rodríguez, J., Sánchez, M., & Martínez, D. (2021). Absorción de agua del basalto y su influencia en la durabilidad de los materiales de construcción. *Revista de Ciencia y Tecnología Ambiental*, 8(2), 67-80.
- [45] Bieniawski, Z.T., Geomechanics classification of rock masses and its application in tunneling., *Proc. 3rd Int. Congress Rock Mechanics*. ISRM, Denver, U.S.A., 1974.
- [46] Brown, E.T., *Rock Characterization Testing and Monitoring.- ISMR Suggested Methods.*, Pergamon Press, Oxford, England, 1981.
- [47] Hoek, E., Bray J.W., *Rock slope engineering*. 3rd ed. London: Int. Min. Metall., London, England, 1981.
- [48] Brady B.H.G., Brown, E.T., *Rock Mechanics for underground mining*. George Allen and Unwin. 537 p, 3rd ed. Springer, Dordrecht, Holland, 2004.
- [49] González, R., López, A., & Pérez, J. (2020). Aplicaciones del fosfoyeso en la estabilización de suelos blandos. *Revista de Ingeniería Civil Sostenible*, 5(2), 87-98.
- [50] López, M., Sánchez, P., & Martínez, E. (2019). Efectos del fosfoyeso como aditivo en el hormigón fresco y endurecido. *Revista de Materiales de Construcción Sostenibles*, 6(1), 29-42.

- [51] Martínez, J., García, L., & Rodríguez, A. (2021). Utilización del fosfoyeso en la fabricación de materiales de construcción. *Revista de Investigación en Ingeniería Civil*, 16(2), 103-116.
- [52] Pérez, A., Rodríguez, M., & Fernández, P. (2020). Control de la erosión con fosfoyeso en obras de ingeniería civil. *Revista de Ciencia y Tecnología Ambiental*, 7(2), 67-80.
- [53] Rodríguez, J., Sánchez, M., & Martínez, D. (2018). Gestión de residuos de la industria del ácido fosfórico: el caso del fosfoyeso. *Revista de Ingeniería Ambiental*, 13(1), 45-58.
- [54] Alaa M. Rashad, Phosphogypsum as a construction material – *Journal of Cleaner Production*, 166, 732-743, (2021).
- [55] U.S. Department of Transportation, User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction: Reclaimed asphalt pavement, Publication Number: FHWA-RD-97-148, Federal Highway Administration, Federal Highway Administration Research and Technology, (2016).
- [56] Anthonissen, J., & Braet, J., Review and environmental impact assessment of green technologies for base courses in bituminous pavements, *Environmental Impact Assessment Review*, 60, 139-147. Publicación de la Universidad de Antwerpen, Bélgica, (2016).
- [57] Kennepohl, Gerhard J.A., Asphalt Pavements and the Environment, Keynote Lecture presented to the International Society for Asphalt Pavements Symposium held in Zürich, (2008).
- [58] Alkins, A. E., Lane, B., & Kazmierowski, T, Sustainable pavements: environmental, economic, and social benefits of in situ pavement recycling, *Transportation research record*, 2084(1), 100-103, (2008).
- [59] Copeland, A. Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: State of the practice (No. FHWA-HRT-11-021), United States, Federal Highway Administration, Office of Research, Development, and Technology, (2011).
- [60] Frederick, G., & Tario, J. D., Quantify the Energy and Environmental Effects of Using Recycled Asphalt and Recycled Concrete for Pavement

Construction, Phase I Final Report, New York State Energy Research and Development Authority, New York, (2009).

[61] ASTM D5444-15 Standard Test Method for Mechanical Size Analysis of Mined Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA., 2015.

[62] AASHTO M323-17 Superpave Specification for Volumetric Design of Asphalt Mixture, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 2017.

[63] Instituto Mexicano del Transporte, N-CMT-2-01-004-02 Morteros, Normativa para la Infraestructura del Transporte, Secretaría de comunicaciones y transportes, Ciudad de México, (2002).

[64] Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, NMX-C-486-ONNCCE-2014 Mortero para uso estructural, Norma Mexicana, Diario Oficial de la Federación, Benito Juárez, Ciudad de México, (2014).

[65] López, P., García, F., & Martínez, J. (2021). Adoquines y ladrillos con materiales reciclados: Una revisión de propiedades y aplicaciones. *Journal of Construction and Materials Science*, 11(3), 210-225.

[66] García, F., Martínez, J., & Sánchez, M. (2019). Estabilidad dimensional de adoquines y ladrillos reciclados. *Journal of Construction and Material Science*, 8(2), 135-150.

[67] Rodríguez, L., Vázquez, R., & Pérez, M. (2018). Gestión de residuos y control de emisiones en la producción de materiales de construcción. *Journal of Environmental Construction Practices*, 7(2), 130-145.

[68] Pérez, M., García, F., & Martínez, J. (2022). Estrategias regulatorias y de mercado para la adopción de materiales reciclados en la construcción. *Journal of Construction Policy and Innovation*, 10(1), 100-120.

[69] Sánchez, J., Rodríguez, M., & García, F. (2021). Conservación de recursos naturales en la fabricación de materiales de construcción. *Journal of Environmental Construction Practices*, 9(2), 100-115.

- [70] Pérez, M., González, A., & Vázquez, R. (2018). Proceso tradicional de fabricación de adoquines y ladrillos: Análisis de costos y calidad. *International Journal of Construction and Building Materials*, 9(1), 45-60.
- [71] Ferrer G.C., Amigó B.V., *Tecnología de Materiales*, 1ra ed., Alfaomega, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, 2005
- [72] Neville A.M., Brooks J.J., *Concrete Technology*, 1ra ed., Longman, London, England, 1998
- [73] Instituto Mexicano del Transporte, M-MMP-4-04-001/02 Muestreo de materiales pétreos para mezclas asfálticas, Normativa para la Infraestructura del Transporte, Secretaría de comunicaciones y transportes, Pedro Escobedo, Querétaro, 2002.
- [74] Instituto Mexicano del Transporte, M-MMP-4-04-006/02 Desgaste mediante la prueba de los ángeles de materiales pétreos para mezclas asfálticas, Normativa para la Infraestructura del Transporte, Secretaría de comunicaciones y transportes, Pedro Escobedo, Querétaro, (2002).
- [75] Instituto Mexicano del Transporte, M-MMP-4-04-002/02 Granulometría de materiales pétreos para mezclas asfálticas, Normativa para la Infraestructura del Transporte, Secretaría de comunicaciones y transportes, Pedro Escobedo, Querétaro, (2002).
- [76] Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, NMX-C-083-ONNCCE-2014 Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes, Norma Mexicana, Diario Oficial de la Federación, Benito Juárez, Ciudad de México, 2014.
- [77] ASTM C1161-02c Standard Test Method for Flexural Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature, ASTM International, West Conshohocken, PA., 2008.
- [78] Instituto Mexicano del Transporte, M-MMP-4-05-053/21 Deformación permanente por rodera con rueda cargada de Hamburgo, Normativa para la Infraestructura del Transporte, Secretaría de comunicaciones y transportes, Pedro Escobedo, Querétaro, (2021).

- [79] Instituto Mexicano del Transporte, M-MMP-4-05-007/00 Punto de inflamación Cleveland en cementos asfálticos, Normativa para la Infraestructura del Transporte, Secretaría de comunicaciones y transportes, Pedro Escobedo, Querétaro, (2000).
- [80] Richardson, Lokensgard, Industria del Plástico, primera edición ed. Paraninfo S.A., Madrid España, (1999).
- [81] Instituto Mexicano del Transporte, N-CTR-CAR-1-02-002-20 Zampeado, Normativa para la Infraestructura del Transporte, Secretaría de comunicaciones y transportes, Pedro Escobedo, Querétaro, (2020).

Anexo 1.

Artículos científicos publicados en revistas:

1. Verónica González Molina, Jesús Agüero López, Abigail Parra Parra, Pedro Antonio Márquez Aguilar, Marina Vlasova; Prospects for the use of gypsum waste for the production of building green ceramics; International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET); Volume: 10 Issue: 05, May 2023; pages 1827-1835.
2. Jesús Agüero López, Roxana Andrea Adame Porras, Marina Vlasova, Pedro Antonio Márquez Aguilar; Building bricks from waste plastic (PET) and crushed basalt as filler; International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET); Volume: 11 Issue: 08, Aug 2024; pages 663-668.

Participaciones en congresos:

1. Jesús Agüero López, Marina Vlasova, Pedro Antonio Márquez Aguilar; Characteristics of the composite material obtained by low temperature sintering of polyethylene terephthalate (PET) with crushed basalt; American Association for Advances in Functional Materials – University of California Los Angeles (AAAFM - UCLA); Los Angeles CA, E.U; 10 - 12 Agosto 2023.
2. Verónica González Molina, Jesús Agüero López, Abigail Parra Parra, Pedro Antonio Márquez Aguilar, Marina Vlasova, Hugo Rojas Hernández; Síntesis y análisis de residuos de yeso para obtención de cerámica verde para aplicaciones en la construcción; V Congreso de Investigadoras del SNI y de Iberoamérica; Tampico, Tamaulipas, México; 10 Noviembre 2023.

3. Jesús Agüero López; 32° Congreso Nacional de Ingeniería Civil; Colegio de Ingenieros Civiles de México A.C.; Ciudad de México, México; 14 - 16 Noviembre 2023.

4. Jesús Agüero López, Marina Vlasova, Pedro Antonio Márquez Aguilar, Roxana Andrea Adame Porras, Verónica González Molina; Characteristics of the composite material obtained by low-temperature sintering of polyethylene terephthalate (pet) with recycled asphalt pavement; 32nd International Materials Research Congress (IMRC); Cancun, Quintana Roo, México; 18 - 23 Agosto 2024.

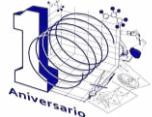
5. Jesús Agüero López, Roxana Andrea Adame Porras; Cálculo de los ejes sencillos equivalentes de carga del tramo carretero Cuernavaca – Chilpancingo Km. 9+800 (Temixco, Morelos); II Congreso de Matemática Aplicada a la Ingeniería, Centro de Investigaciones en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp); Cuernavaca, Morelos, México; 5 - 6 Septiembre 2024

Producto de investigación (Solicitud de Patente):

1. Solicitud de patente de invención: Fabricación de materiales de construcción (bloques, ladrillos, adoquines, tejas) a partir de mezclas de residuos PET (tereftalato de polietileno) y basalto; Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI); fecha de solicitud de ingreso 27 septiembre 2023.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Instituto de
Investigación en
Ciencias
Básicas y
Aplicadas

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

JEFATURA DE POSGRADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

Cuernavaca, Morelos, 11 de febrero de 2025.

DR. J JESÚS ESCOBEDO ALATORRE
DIRECTOR DEL CENTRO DE INVESTIGACIÓN
EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
P R E S E N T E

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada: **Desarrollo de una tecnología para la fabricación de adoquines con base a material reciclado**, que presenta el alumno **Jesús Agüero López**, para obtener el título de **Doctorado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas**.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es **APROBATORIO**.

Atentamente
Por una humanidad culta

DR. ARTURO MOLINA OCAMPO

DRA. ABIGAIL PARRA PARRA

DRA. MARY CRUZ RESÉNDIZ GONZÁLEZ

DRA. HEIDY GÓMEZ BARRANCO

DR. JAIME ANDRÉS QUIROA HERRERA

DRA. VERÓNICA GONZÁLEZ MOLINA

DR. PEDRO ANTONIO MÁRQUEZ AGUILAR

Se adiciona efirma UAEM



Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México, 62209, Edificio 65,
Tel. 777 329 70 00 Ext. 6208 / ciicap.posgrado@uaem.mx

UAEM
RECTORÍA
2023-2029



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento con firma electrónica UAEM, soportada por el certificado vigente a la fecha de su elaboración y con efectos plenos de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS PUBLICADOS en el ÓRGANO INFORMATIVO UNIVERSITARIO "ADOLFO MENÉNDEZ SAMARÁ" número 117 de fecha 20 de abril de 2021.

Sello electrónico

PEDRO ANTONIO MARQUEZ AGUILAR | Fecha:2025-02-11 09:39:06 | FIRMANTE

jwPrRtHdVLRsRq1ghJ8i/P1xzXgRc8KjGqlpHCXWpA2ZxK121xIastYnOAwdBcQk5N77hf5EZSMiRIYEA6Tgf5JS4OwUTUCpKqqrWAN4zcknBvl+M7NJ/1d/wuS+1IneRnxkSK6LhfeRmPshR2TVORafwK2lf3li4xlGmLDXlex8qOAPukxiRaJulJuHf0GhJ/Imn93vWqNEV8c+vLwwlc24EPF5snb1FxF9VRY2n1uloK7todDV2aidsuLUX5yll6MeqwrK3F1PM/iJMOedeG08wrlIqifgzILUBGvLfMLCsAgLGi19K68OCmVVGy+TimB65NDshR8OAK3NfeX3A==

HEIDY GÓMEZ BARRANCO | Fecha:2025-02-11 10:25:01 | FIRMANTE

hA3o9gr2quBuKdmbK+1QRgvdQhtQDXotNKMabgj/8tRG9GQ2Ro2ymaeg3KXkNPYdR62zbPpjinuBwal5p3V9z8N62b9VCC+A/QChK0enR91VHnbZ3/TBzTcWT6/iOng6jGrORkJFGasn6mQ9H0BJaftrqpxbQWGD12Msl/9qPDSCAQ+QeECZ7URY80kdmh0MBRgBxgQzNcb8SWx8EZrtpp+gQSE+Y6WPLGyutl9xonWsTODmnGBT0rLQb/rinQ5NNfLHlnPuDUW1QoLJyZ446xlvg2xPhXinT7NdG61ouXiGKChQDzk4G5CAFZcEWQOpIkX99sct7JfCc7S5DCQ==

JAIME ANDRÉS QUIROA HERRERA | Fecha:2025-02-11 13:04:04 | FIRMANTE

YXzfFihdLcAlusB452wOdTiQ+EXP84s3y9hQPwssNE/hlyoeaJVveheM6pqrQFwgC4vbr1bwysf5fuZhx8chXWARYm6ShxsC+eqFMfzdk+jxCpkGyi+pqMz+Nzcmj+WcP84Qmi2dN64o0ukrQSi0M1OyO6rZUy0uF2VUvkf4uqT9Y/6YTk+fWajDD+D74z4cYhkGRzQNNFwydZtWkd98Zlea0xe/VKkZ82tld81tSC69iWgggyRzkyghfX0bBc0rn/Yu30ILz/bnnzoKe8I8SfiUJAINrt3wsQbQz7Lajv+dAc7JnIG0ce8W84Esk03Unh1HEswGR4+v8/HZRqW==

VERONICA GONZALEZ MOLINA | Fecha:2025-02-11 13:19:24 | FIRMANTE

UyicVdNO36mBpZ693aim+feUqfNnbs33ntu0I+eBI0I7j681cfl0vE/AejtWpJfbmd3p0oiYNzPPoLp5iVNRvYU84sDAIKj8K6Xtz05dgG0Mv3uTT5Z5TY5xo6omL5XZk1RLhVrcHZOlVUJf5ssQDFIQRNT04BBjKUVUEa4oN5uQWpYOQdljtgSgFVl7lqV8SUf0XySPeTcXryzEhO2QebdPH1S1o3wAnxLtskBNRfGGC4+MKvogPZkDuXfeipHoEptqM0mmIfsf862RVnPi+sawR1Jr565G1v+/Zcsx0AEmNDKHprzEdvB2G+XQf4tIOiGZN1Au/3gyTA6naxmg==

MARY CRUZ RESENDIZ GONZALEZ | Fecha:2025-02-12 09:25:38 | FIRMANTE

kdlX78AgpZVfBa3LLgV9+jYg48v3BzbzaYRb4KiLyuMtQldMzESSq7j4SIEjYKKI83E0B2gsMjfhX0w6TIsL3+ANs8J/BCixlNzIDowNdk06dfaXofF5hsab83gYAgqNutlpQmZEOLO8NsisLESttugNaSSz1fangggUUV8dOVIQcoxaeLoKf1YQGJutU1AvcWliz7VIUbQIINiIkEqAD7m+c1/GDG+TYQerhfH8E6hfkN1+SRpOWrZndPqfjJNfapcvo0Yva4bTz0fnWaGtSUoids36kvr7nLxQjXnvAEngYGwhV2TgRuipbNLLY6yTPPFc8w/hCBVfO2qT/hnw==

ARTURO MOLINA OCAMPO | Fecha:2025-02-12 12:26:48 | FIRMANTE

q6AcPLsgp+eY2gActDdUgnODXomlo51yd8P9wkrnDbuNIM4ZKST92dQabmZAIC7qj9su8j8tpgKC6hMPB7i/Pq86UWfjrArb8NOsMi/dhSEIQPDJvSkvUDL3yLFeYigzfwlu91BDpWwAzhNHMT85QejhUbyyiac6CKSz6aYtiOME46MepByiCV5uB+qsn2T9a3IE93l6vSc/2hOXlpBipsKBeHBY9zbd8mhKzGO6TH+5Kdp9KXfoz6gzhrfk/OOig/cP6SRnF868g43C2vAWVGoe+eOEXvdo3bYwdTTolJpMKzZJqmRpZa3nk4k0AC2QLu+6bU50ILP7clsSiBeR+g==

ABIGAIL PARRA PARRA | Fecha:2025-02-13 09:17:53 | FIRMANTE

WFj4o7KxwDaazqsVSnR5/lkykTmJ2tfp256PSwVAPT8PZa/YwFLFS+v/nz8Eoh756U/7IGIM9U/1rtf2sUwe/s1GsKiBZ3jclsJlCwQVjhZG0kOxtLdA7axP37dV2/tcQ/atZBu/r2zwctggLZh9Y3HjpyJIPskX06f5E/bcsIq03rwlJSGbXGnI5Ug/tZzqgil5fD6jPd8uM2s7x3DnVurLkBgPmbb3AO01NyKu1gpvbaZYXhCYIMjpaTu1jnYe/66JJPubDsuL5jxWtW9ie4+Kmol2qxAnZypy17tqf6yCtQXUjP+IwTz12rkmNBH5IH15Q8dF4D1Zvx5EIIIRA==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



VQ1ctZ0fy

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/7zsoefvWtK1JSBNznP67ov9XcUSNY56i>



UAEM
RECTORÍA
2023-2029