

Empleo de material plástico reciclable para la fabricación de materiales de construcción: una revisión

Use of recyclable plastic material for the manufacture of building materials: a review

^{a*}Alexandro Banini-Ospina, ^bSaieth Baudilio Chaves-Pabón



^{a*}Ingeniero Civil, Programa de Ingeniería Civil, Facultad de Estudios a Distancia, Universidad Militar Nueva Granada, est.alexandro.banini@unimilitar.edu.co, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3459-157X>, Cajicá, Colombia



^bDoctor en Ingeniería Geodésica y Cartografía, Docente del Programa de Ingeniería Civil, Facultad de Estudios a Distancia, Universidad Militar Nueva Granada, e-mail de correspondencia: saieth.chaves@unimilitar.edu.co, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6950-9401>, Cajicá, Colombia

Recibido: 08 de febrero de 2022 **Aceptado:** 22 de junio de 2022

Forma de citar: A. Banini-Ospina, S.B. Chaves-Pabón. "Empleo de material plástico reciclable para la fabricación de materiales de construcción: una revisión", *Mundo Fesc*, vol. 12, no. 24, pp. 173-189, 2022.

Resumen

La inclusión de materiales de difícil degradación como los Deshechos Plásticos (PW) se han presentado como objeto de estudio a través de los últimos años, se hallaron formas de reutilizar dicho material, se observaron en ellos nuevas y distintas formas de inclusión de estos materiales, como el Tereftalato de Polietileno (PET) en agregados grueso y finos, en forma de áridos, fibras plásticas y fusionado a altas temperaturas con agregados naturales, se obtuvieron óptimos comportamientos higrotérmicos, resistencias a la compresión y flexión destacables, ductilidades aceptables entre otras características, así mismo en similares estudios con inclusión de Polietileno (PE), Polipropileno (PP), se observaron mezclas de PET con otra variedad de PW y con otros materiales de difícil degradación distintos a PW, donde se destacaron importantes resultados, de igual manera se han reportado estudios de materiales con inclusión de PW en fabricación de laminados, otros como ladrillos cocidos y sin cocer con ciertas inclusiones de PW como Polietileno de Baja Densidad (LDPE), Polietileno de Alta Densidad (HDPE), aquí se presentan fusiones de vidrio triturado con PW que muestran significativos resultados mecánicos, como se presentan en suelos arcillosos estabilizados con estos PW y los encontrados con el uso de Pasadores Plásticos Reciclados (RPP) para la estabilización de taludes y terraplenes.

Palabras clave: Desechos plásticos, material reciclable, nuevos materiales, materiales amigables, material de construcción.

Autor para correspondencia:

*Correo electrónico: jmorelosg@unicartagena.edu.co



Abstract

The inclusion of materials that are difficult to degrade, such as Plastic Waste (PW), has been the subject of study in recent years. Ways of reusing this material have been found, and new and different ways of including these materials, such as Polyethylene Terephthalate (PET) in coarse and fine aggregates, have been observed in them, in the form of aggregates, plastic fibers and fused at high temperatures with natural aggregates, excellent hygrothermal behavior, outstanding compressive and flexural strengths, acceptable ductility among other characteristics were obtained, likewise in similar studies with the inclusion of Polyethylene (PE), Polypropylene (PP), In similar studies with the inclusion of Polyethylene (PE) and Polypropylene (PP), mixtures of PET with another variety of PW and with other materials of difficult degradation other than PW were observed, where important results were highlighted, likewise studies of materials with inclusion of PW in the manufacture of laminates have been reported, others such as fired and unfired bricks with certain inclusions of PW such as Low Density Polyethylene (LDPE), High Density Polyethylene (HDPE), here are presented fusions of crushed glass with PW that show significant mechanical results, as presented in clayey soils stabilized with these PW and those found with the use of Recycled Plastic Pins (RPP) for slope and embankment stabilization.

Keywords: Plastic waste, recyclable material, new materials, friendly materials, construction material.

Introducción

Debido a las preocupantes estimaciones para el año 2050, sobre la cantidad de toneladas de PW que finalizarán su vida útil en vertederos [1], [2] afirman que en el reciclaje de una tonelada de plástico se economizan 16.3 barriles de petróleo, 5774 kilovatios-hora de energía y 22.9 metros cúbicos de espacio en vertederos. Dado lo anterior, y a estas cuantificaciones del problema, se ha convertido en trascendental la necesidad de hallar formas de reutilización de dicho material (PW), como en el caso [3] quienes afirman que las paredes fabricadas con PW, para este caso botellas de PET, poseen propiedad mecánica, sin ser quebradizas ni flexibles, y tienen además, capacidad de resistir cargas de choque abruptas. Del mismo modo [4], en India con su actual incremento en el crecimiento de la población, dada la necesidad de construir nuevas carreteras, han incluido diferentes porcentajes de PW como agregado de mezclas asfálticas obteniendo importantes resultados con un incremento en un 21% en el módulo de Marshall, con una inclusión del 8% de este material. De igual manera podemos ver los óptimos resultados obtenidos en pruebas

de resistencias a la compresión, flexión, a la fractura y el comportamiento de la curva de tenacidad en mezclas de laterita con desechos de PE como refuerzo de mezclas asfálticas [5]. Por otro lado, se aprecia como para la fabricación de Agregados De Plástico Reciclado Sintético, al incluirse el Polietileno Lineal De Baja Densidad (LLDPE) en cantidades de 30 y 50% para mezclas que contenían cenizas volantes, finos de cantera con tamaños respectivos de 6.14, 186.37 y 19.27 micrómetros, arena roja y Cemento Portland Convencional (OPC), han alcanzado parámetros de acuerdo a la norma ASTM C 330-04 en mezclas de hormigón con agregado plástico elaborado con 50% LLDPE y 50% Finos de Cantera, y 30% Agregado Plástico y 70% Finos de Cantera, se reportaron resultados que demuestran viabilidad de su uso en hormigones que no requieren altas resistencias como es el caso de pavimentos rígidos [6]. Por su parte, en [7] la fabricación de laminados producidos con PET, epóxico adhesivo de dos componentes de viscosidad media y Polímeros Reforzados Con Fibra (FRP), para evaluar su comportamiento a temperaturas de 25, 50, 100 y 125°C, han obtenido la degradación de resistencia a la tracción y los módulos, a temperaturas

mayores a 50°C, siendo esta temperatura el punto en el cual la resistencia a la tracción se incrementa, asociada al curado del epoxi, y una deformación por rotura del 9% como valor medio a temperatura ambiente, incrementándose un 14.9% a 125°C. Del mismo modo, [8] asegura que un reemplazo del 55% de PU por esta misma cantidad de PET en la fabricación de placas para aislamiento acústico cumplen técnicamente los requisitos de aislamiento no solo térmico sino también acústico. Podemos ver gran número de estudios y por ende importantes resultados obtenidos, cuando de agregados para concreto se mencionan, se aprecia como en [9] aseguran que con una variedad en la inclusión del 5%, 10%, 15% y 20% de Hormigón Plástico Reciclado (RPC), han obtenido una influencia significativa en tenacidad, ductilidad y un aumento del 154.11% en absorción de energía. De igual manera, en [10] sus trabajos determinaron resultados, obtenidos en ensayos CBR, comparables a los arrojados por materiales de cantera típicos con adición del 3% y 5% de Plásticos de LDPE o HDPE, siendo estas mezclas viables para usarse en capas de base y subbase de pavimentos. Por otra parte, en [11] han creado agregados artificiales de PET con inclusión de cascarilla de arroz, fundiendo ambos materiales, y luego de su curado sometiénolas a temperaturas de 100°C, 200°C, 300°C y 400°C, para determinar su resistencia al calor, logrando en estas mezclas, ásperas y porosas superficies, con mayor absorción de agua, menor gravedad específica y densidad. En [12] han tratado químicamente PW como el PET, Polioximetileno (POM), Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) y Policarbonato (PC), remojándolos durante 6 días en soluciones de hidróxido de sodio (NaOH) e hipoclorito de sodio (NaCl) (5% NaCl + 4% NaOH), y en otro tratamiento, aparte de esta misma solución han lavado los PW con cloro doméstico, lavado con agua, secado y calentado antes de su uso, para

luego utilizarlos en mezclas tipo mortero, logrando mejores resultados en el segundo tratamiento, así mismo este tratamiento posee mayores resultados en resistencias a la compresión, tracción y flexión, cuyos materiales PW pertenecen al POM y al ABS.

Con la presente revisión bibliográfica sobre la fabricación de materiales de construcción con la inclusión de PW y la sustitución de materiales convencionales por dichos PW, se pretende caracterizar resultados analíticos, pruebas de laboratorio y seguimiento de estudios precedentes, realizados con el fin de obtener una relación viable de materiales de construcción y PW, donde se evidencian significativas reducciones en la explotación de recursos naturales y en la disposición final del reciclaje de estos materiales a nivel mundial. En definitiva, el objetivo principal del presente estudio, es servir como punto de partida y fuente fiable de consulta para futuros estudios e investigaciones sobre el tema.

Como metodología, desarrollada para este ejercicio de investigación y con la finalidad de lograr el objetivo principal, se elaboró una matriz con datos informativos de 50 publicaciones realizadas sobre la fabricación de materiales de construcción con la inclusión de PW tales como PET, PP, PE, originando filtros que permitieron establecer el tipo de PW utilizado en las investigaciones para los materiales de construcción conseguidos en pruebas de laboratorio, que siendo objeto de estos estudios, posibilitaron el inicio de un artículo de revisión bibliográfica, que concentra hallazgos de dichos materiales encontrados sistemáticamente. La recopilación de los artículos objeto del presente estudio, se realiza a través de bases de datos virtuales de alto impacto como ASCE, Springer, Elsevier, entre otras.

Agregados

Importantes hallazgos en laboratorios, respecto a este tema, han permitido evidenciar la viabilidad en la fabricación de agregados para mezclas de concreto (reemplazando con estos los agregados naturales), como agregados plásticos tipo fibras, y otros utilizados como sustitutos de áridos, todos ellos realizados con ciertos porcentajes en la inclusión de derivados de PW, tales como el PET, PE, PP.

Agregados a partir de la inclusión de PET

Siendo este material de difícil degradación debido en parte a su composición petroquímica [1], al incremento generado, en las cifras de producción de su disposición final en vertederos a nivel mundial, y a su probable y alto reciclaje, ha sido de gran interés para estudios que buscan encontrar su posible inclusión en la fabricación de materiales de construcción, objetivo en el cual se basa el presente artículo. En Italia y Francia, por ejemplo, como se menciona en [13], mediante la herramienta de simulación SPARK se ha evaluado el comportamiento higrotérmico de tres fachadas de edificios con tres distintas clases de hormigón en sus capas, una de ellas con la inclusión de tereftalato de polietileno reciclado (R-PET), siendo esta mezcla, la que ha logrado obtener una menor emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y un menor consumo de energía eléctrica para sostener ambientes cálidos en su interior, no obstante, dicen sus autores sobre el hormigón con inclusión de R-PET, que poseen pocos estudios relacionados con sus posibles aplicaciones en edificios durante cortos periodos, sus consecuencias directas en términos de consumo de energía y calidad del aire interno. De semejante manera, con la utilización de PET, según [14] aseguran que al preparar mezclas de hormigón diseñadas,

para nueve muestras, con una resistencia a la compresión media del cubo de 30 N/mm² y asentamiento objetivo de 30 a 60 mm para mezclas reforzadas con PET, y de 100 mm para la mezcla control, incluyendo fibras plásticas (FP) obtenidas de botellas de PET de distintas geometrías “deformadas y rectas” y longitudes de 30 y 50 mm, con 2 y 3 muescas respectivamente, para así incrementar el anclaje efectivo de la fibra en la matriz del hormigón, han encontrado una viabilidad al incluir dichas fibras en las mezclas de hormigón, debido a los hallazgos arrojados en la prueba de flexión al hormigón reforzado con PET, que presentó un pico más alto de dicha prueba en comparación a la mezcla control, cabe resaltar que, las mezclas con los volúmenes de fibras mayores y las mezclas con fibras deformadas han presentado mejor resistencia residual, también se observa como las mezclas con inclusión de fibras más cortas alcanzaron una carga máxima levemente menor con las demás mezclas, se observa además, una leve reducción en resistencia residual inmediatamente después de presentarse la fisuración, probablemente es debida a la baja resistencia de la relación de aspecto y unión de las fibras más cortas. Por su parte en [15] han evaluado la sensibilidad a la humedad, la resistencia al agrietamiento a temperaturas bajas mediante prueba de fractura por flexión semicircular (SCB) y las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas con inclusión de PET en forma de agregados minerales, con tamaños que superaban el tamiz N° 4 y se retenían en el tamiz N° 8, y con cantidades volumétricas de 0%, 30%, 50%, 70% y 100%, elegidas en función de las diferencias de gravedad específica del material de estudio PET, y para los agregados minerales vírgenes, bajo la norma ASTM E2937, han verificado por medio de la espectroscopía infrarroja que el material a utilizar perteneciera a los polímeros PET, al aplicar el método de Marshall para cada contenido específico de

PET y la prueba de resistencia a la tracción indirecta (ITS), lograron obtener resultados significativos en el aumento de la resistencia a la formación de surcos de un 50% con una inclusión del 100% de PET, a diferencia con una inclusión de PET del 30% al 100%, la probabilidad de rotura ha sido del 80%, resaltando como significativos estos aumentos según sus autores. Del mismo modo, otros resultados reflejaron que el aumento de la rigidez con incrementos graduales de PET, mejora de la resistencia a la humedad, adicionalmente, los autores refieren que no es posible demostrar tendencia alguna de energía de fractura. De la misma manera, en [16] han reemplazado volumétricamente en un 10% el agregado fino por partículas de PET, se realizaron pruebas de compresión en mezclas diseñadas con 14 días de curado y resistencia a la compresión de 53 MPa, logrando determinar que las mezclas con inclusión de PET ha alcanzado rendimientos similares en compresión, se demostró que el tamaño de dichas partículas de PET de 4 mm, son de uso factible en concretos estructurales, así mismo la superficie rugosa en dichas partículas y su forma irregular permiten evitar significativas superficies de falla, también aconsejan los autores la necesidad de investigar más, sobre la inclusión de este material, su unión por medio de procedimientos químicos, posibles adhesiones de refuerzo con el acero y efectos de este material en la durabilidad, trabajabilidad, reacción frente al fuego y costo de producción para investigaciones futuras. Según [17], todas las mezclas de hormigón modificadas probadas, han logrado aceptables límites de absorción de agua, al incluir en estas mezclas partículas de PET como sustituto de agregado grueso convencional (CA), previamente limpiadas de impurezas, residuos de etiquetas y adhesivos, trituradas y fundidas alrededor de 260°C, siendo finalmente vertidas, en este estado, en moldes para dejarlas enfriar

por 24 horas, después de este tiempo han sido fracturadas en partículas más pequeñas para así obtener tamaños adecuados al momento de realizar la sustitución. Según reportes de [18], han probado para sus investigaciones, inclusión de residuos adaptados físicamente de PET con diseño en forma de escama como materia prima, en la mezcla de hormigón a fallar, combinadas con cenizas de lodo de depuradora y cenizas volantes de sílice provenientes de carbón, con el fin de evaluar las propiedades utilizables y obtenidas con los agregados ligeros compuestos (CLA), los cuales detallan los autores como un agregado completo y no como un compuesto ecológico con inclusión del 100% de residuos de PW, además han señalado como importante el estudio efectuado, puesto que se evidencia la utilización de dos tipos de materiales de distinto origen, donde se han logrado obtener densidades entre 1400 y 1700 kg/m³, según el método aplicado para la producción del material con la cascara mineral. Por su parte, en la investigación de [19], debido a la poca adhesión que presentan los polímeros y la pasta de cemento, previamente han cortado PET en forma de escamas, y posterior a ello lo han modificado, por medio de rayos gamma, para utilizarlas en reemplazo de arena con tamaños de 0.71, 1.4 y 2.8 mm al 1, 2.5 y 5% del volumen, obteniendo un módulo de elasticidad de 114%, y resultados óptimos de incremento en pruebas de resistencia a la compresión del 34%, igualmente estas resistencias disminuyen al aumentar el tamaño del PET, sin embargo, en cuanto a capacidad de deformación se refiere, todas las probetas presentaron comportamiento opuestos, y las características mecánicas, según mencionan los autores, están unidas a las alteraciones debidas a la irradiación efectuada a las propiedades fisicoquímicas del cemento y del PET, contrario a esto, [20] utilizaron PET en forma granular y sin ningún tipo de proceso como sustituto de arena de río en

porcentajes de 0, 2,5, 5, 10, 15 y 20%, para la preparación de mezclas, junto con cemento portland brasileño CP con contenido aproximado de 6% y 14% de puzolana y cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), utilizando como agregado, arena de río (silíceo) con peso específico de 2,64 g/cm³ y módulo de finura de 1,36, se evidencia que no existe pérdida de agua del sustrato asumido por el material ligero resultante en las mezclas. en la realización de sus estudios en morteros en estado fresco y seco, hallaron también que para el estado seco con la inclusión de PET, en la mezcla cemento portland/cal, se logra un medio para suprimir residuos de este PW, disminución de la rigidez del material, mejoría en la permeabilidad al vapor de agua y en la liberación de agua por secado, ya en estado fresco se logra aumentar el contenido de aire, posible impedimento de pérdida de agua del sustrato, además de ofrecer un material liviano, y a causa de su superficie lisa y su menor absorción de agua ofrece mejor trabajabilidad. En investigaciones de [21], los resultados de sus trabajos concluyen que con la adición de tiras de plástico PET orientadas horizontalmente (MC-H) y aleatoriamente (MC-R) en mezclas de hormigón, contribuyen positivamente al comportamiento de la mezcla en términos de rigidez, mayor resistencia y menor desviación estándar, señalando como aceptable la orientación (MC-R) para su utilización en la construcción, aunque sugieren acometer una detallada investigación que confirme estas observaciones con su posible impacto, de igual manera aseguran que el modelo de análisis propuesto para cuantificar la función de las tiras de PET en términos de esfuerzo de compresión/tracción a través de la dirección lateral, describe muy bien la evolución de la respuesta tensión deformación. Por su parte, en [22] han conseguido valores esperados referentes a características de estabilidad, resiliencia, trabajabilidad y resistencia al deslizamiento en concreto bituminoso (BC), con inclusión

de PET para recubrir el árido en sus mezclas “agregado recubierto de plástico” (PCA), obteniendo resultados de mayor estabilidad y porcentaje de vacíos de agregados en mineral (VMA), en relación con las mezclas tradicionales, estabilidad de Marshall, el porcentaje de PET incluido para modificar las mezclas BC y adecuado para lograr óptimos resultados es del 7%, además, concluyen los autores que el PET, al ser utilizado como modificador de áridos, presenta reducción de la porosidad y mejoras en propiedades de unión de la mezcla. Autores como [23], señalan que con fibras de refuerzo para mortero, cortadas con un ancho de 2mm y una longitud de 20 y 50 mm, dispuestas en volúmenes de 0.0 y 1.5%, han diseñado la matriz del mortero con parámetros de flujo del 100% y resistencia cúbica de 30 MPa a 28 días, evidenciando que las fibras utilizadas con PET minimizan el agrietamiento a causa de la contracción plástica de las losas, que mejoran con fibras del tamaño de 50 mm la tenacidad a la flexión hasta en un 61% y presentan un incremento en resistencia a la flexión hasta en un 84% en relación a morteros sin fibras. En sus investigaciones [24], quienes en mezclas frescas con fines de cuantificación de costos y huella de carbono, han encontrado despreciables cambios en la trabajabilidad, reducción de las resistencias a la compresión, modulación y flexión, en sus mezclas de mortero realizadas con OPC, polvo de piedra caliza, e inclusión de PET recolectado aleatoriamente en playas sin ningún tipo de lavado y limpieza, además de PC, PVA, PP y PVC.

Agregados a partir de la inclusión de PET y otros PW

Otros estudios se han enfocado en incluir varios PW, para dicha fabricación de materiales de construcción, obteniendo igualmente interesantes resultados, que permiten ver viable estas inclusiones. De

acuerdo a [25], en mezclas de hormigón han agregado como fibra de refuerzo, además del R-PET con longitudes de 50 a 60 mm y ancho de 2 a 3.5 mm, residuos de sacos de plástico tejido reciclado (RWS) de longitudes similares, par de anchos de 2.5 a 3 mm, consiguiendo en esta mezcla una mejoría de la tenacidad, alta resistencia a los álcalis y aumento de la resistencia a la tracción por rotura, además los resultados de propiedades mecánicas reportados de esta fusión en hormigón agregado reciclado reforzado con fibra (RCA) han cumplido las especificaciones de diseño exigidas estructuralmente para pavimentos rígidos, aconsejan para estudios futuros, considerar un estudio de impacto ambiental debido a la inclusión de estos materiales para aplicaciones prácticas. Por su parte [26], en sus mezclas de hormigón permeable han utilizado “fibras” de PET triturado con variedad de volumen y “agregados” de gránulos redondeados de poliestireno expandido (EPS), cortados con longitudes de 4.75 y 9.5 mm, y volúmenes del 20%, obteniendo mejores resultados de resistencia a la flexión, significativa disminución en la densidad, aumento en coeficiente de permeabilidad, incremento de la relación de porosidad. Debido a lo anterior, dicen los autores que, si la resistencia no es el principal problema, pero sí lo es la escorrentía, el hormigón permeable con 1% de PET y 20% de EPS puede considerarse como una opción adecuada y viable en la gestión de agua pluvial.

Agregados a partir de la inclusión de PET y otros materiales “No PW”

La diversidad de estudios relacionados con la fabricación de materiales de construcción han permitido incluir en ellos, aparte de PW otros materiales de difícil degradación, en este marco de estudios, en trabajos de [27] han utilizado en mezclas, además de escamas de PET lavado con hidróxido de sodio (NaOH), caucho de neumático desmenuzado lavado y

limpiado totalmente sin evidencia de polvo, ambos como sustituto del 7.5% de la cantidad volumétrica de arena, exponiéndolos a temperaturas de 23, 200, 400, 600 y 800°C, obteniendo una resistencia a la compresión de 34.6 Mpa a temperatura ambiente de “23°C”, a medida que las temperaturas se elevaron, estas resistencias se han visto disminuidas, siendo la temperatura de 600°C el punto en el cual estos materiales se han degradado, a 800°C se ha visto una reducción del 51.6% en comparación con la mezcla convencional, además en el hormigón esta mezcla causó mayor trabajabilidad a causa del caucho desmenuzado, y ha disminuido con presencia de PET. De igual forma, en estudios de [28] trataron en relación 1:2 el PET con Trietilentetramina (TETA) y Etanolamina (EA) para formar PET-TETA y PET-EA respectivamente, lo mezclaron con betún virgen y 18% de caucho granulado (CR), formando betún engomado modificado, la adición de PET-TETA y PET-EA ha sido del 2%, obteniendo mejor resistencia a la deformación de la mezcla con PET-TETA, y según sus autores, reciclar químicamente el PET residual en sustancias funcionales puede incrementar el rendimiento general del betún engomado y que el método propuesto en su investigación puede mitigar problemas de vertidos de PET y CR, pudiendo convertir estos desechos en nuevos materiales para construcción de pavimentos, también aconsejan realizar estudios sobre el rendimiento de mezclas bituminosas con inclusión de ambos materiales, no solo en laboratorio sino en campo. Paralelamente, en estudios de [29] al incluir PET y variar su grosor desde 0.2 a 2.0 mm, en mezclas de cemento con deshecho de construcción y demolición, conformado por Agregado De Concreto Reciclado (RCA) y Ladrillo Triturado (CB) con tamaños máximos de 20 mm, todos ellos secados en horno a 104°C, luego de las pruebas de resistencia a la compresión no confinada (UCS), han determinado que la alta adición

de PET ha reducido considerablemente los valores del módulo de flexión y el módulo de ruptura de RCA y CB, al igual que con la prueba de UCS, además es relevante señalar que las mezclas formadas por 5% PET más 95% RCA y 5% PET más 95% CB, ambas con cemento estabilizado al 3% pueden reemplazar material virgen de cantera utilizados con estos fines, ya que dichas mezclas se podrían utilizar como materiales en la construcción de subbases y bases de pavimentos, lo cual es coherente con las afirmaciones realizadas por [30], quienes confirman lo mismo con 125 MPa obtenidos en Pruebas Triaxiales De Carga Repetida (RLT), en sus estudios efectuados en mezclas de 3 y 5% de PET con materiales de Desecho de Construcción y Demolición (C&D) conformado por RCA y CB, además se han obtenido valores por encima del 80% en pruebas de CBR, sugieren sus autores seguir la investigación con adición de aglutinantes tradicionales como cemento para las condiciones de unión, o estabilización con la utilización de geopolímeros.

Agregados a partir de la inclusión de PE

De la misma manera, en valores de degradación, el PE ha sido objeto de estudios para su inclusión con otros materiales convencionales. En investigaciones de [5], han agregado laterita a sus mezclas de mortero, polvo obtenido de disolver plásticos de LDPE a una temperatura de 140°C, y han logrado óptimos resultados en pruebas de resistencia a la compresión y a la flexión, resistencia a la fractura y el comportamiento de la curva de tenacidad en dichas mezclas, adicionalmente, debido a las altas resistencias y su tenacidad han propuesto esta mezcla como reemplazo de bloques convencionales, señalan sus autores como necesario trabajar en busca de valorar efectos potenciales de las propiedades mecánicas en los componentes de la mezcla de laterita reforzada con PE

debida a su posible degradación ambiental. En trabajos efectuados por [31] han utilizado gránulos de LDPE con diámetro nominal de 6 mm, gravedad específica del 0.95%, y en 24 horas con capacidad en absorción de agua de 0%, con niveles de reemplazo del agregado natural de 10, 20, 30, 40 y 50% del volumen de agregado total, para mezclas de concreto permeable, se estableció una reducción en el contenido de vacíos cuando se presenta aumento en las proporciones de LDPE y reducción de abrasión presente en las mezclas, sin embargo los autores recomiendan para estudios futuros, efectuar otros como porosidad, tasa de infiltración y conductividad hidráulica. Similarmente en estudios de [32], aseguran que a corto plazo, con la inclusión del PE como sustituto de áridos, aumentará la eficiencia en la resistencia del pavimento de carreteras a altas temperaturas, y debido a los gastos en mantenimiento y diseño, se mejoraría el rendimiento y la sostenibilidad a mediano plazo con la inclusión del PE, se beneficiarán los hábitats locales con un incremento de biodiversidad, mejorando así la percepción local del medio ambiente, y a largo plazo, según sus autores, se conseguirán enormes beneficios de la industria y por ende en las economías mundiales, además se podrían conservar adecuadamente los recursos naturales. En otros estudios, como en [10] han utilizado para sus mezclas plásticos de LDPE y HDPE en contenidos de 3% y 5%, y RCA, concluyendo que las muestras dispuestas para ensayos CBR han producido valores comparables a los arrojados por materiales de cantera típicos con adición del 3% y 5% de LDPE o HDPE, siendo estas mezclas viables para usarse en capas de base y subbase de pavimentos, así mismo las mezclas con HDPE arrojaron mayores valores de UCS y el valor de Young frente a LDPE.

Agregados a partir de la inclusión de PP

En estudios con PW, se pueden encontrar hallazgos importantes en materiales investigados con adición de PP, por ejemplo en [33] han eliminado impurezas y desechos del PP, han procedido a granularlo en pequeños trozos, alcanzando Áridos Plásticos Reciclados (RPA) de TMN de 9.5 mm, adicionándolo después en proporciones de 10, 20, y 30% del volumen para reemplazar agregados naturales (NA) gruesos en sus mezclas de Hormigón de Agregado Plástico Reciclado (RPAC), con 28 días de curado, se obtuvieron resultados mecánicos cercanos en comparación del Concreto Agregado Natural (NAC) con adición del 20%, igualmente dicen sus autores que este RPAC sirve como opción viable en aplicaciones estructurales, no obstante, en pruebas de alta resistencia con adición de más del 10% se podrían degradar las resistencias. En [34] para sus estudios han incluido fibras de PP en 0.0625, 0.1250, 0.1875, 0.2500 y 0.3125% de la masa de cemento, residuos y polvo de vidrio, con tamaños de PP de 31.2 y 1152.5 mm y circunferencia media de 538.2 micrómetros, se observó la disminución en la prueba del cono de asentamiento, no se presentó afectación del contenido de aire e incremento de la resistencia a la compresión con aumento en el contenido de PP, la relación de Poisson no se ha visto afectada con la adición de PP en 0.3125%, en este sentido, sus autores sugieren más investigaciones a partir de este estudio, también aseguran que los elementos sin deflexiones exigidas, para tablestacas y columnas, pueden componerse de mezclas de cemento-vidrio y fibras de PP con adición de 0.3125%.

Agregados a partir de la inclusión de distintos PW

Similares investigaciones han indagado la preparación de mezclas con inclusiones

de varios Residuos de Plásticos Reciclado (RPW), como los realizados por [35] quienes han incluido porcentualmente en sus mezclas, 34% de Polietileno Reciclado De Alta Densidad (RHDPE) y 25% de Baja Densidad (RLDPE), 4% de Cloruro De Polivinilo Reciclado (RPVC), 9% Poliestireno Reciclado (RPS) y 11% de Polipropileno Reciclado (RPP), para compararlas con mezclas con contenido de 34% de RPET, consiguiendo un concreto de mayor densidad en términos de rendimiento viscoelástico general del RPW frente al RPET, siendo RPW las mezclas que han comprobado mejoría en sus módulos dinámicos y vida de fatiga mejorada frente al Hormigón Asfáltico (AC), pero aconsejan sus autores realizar más estudios sobre RPW. Del mismo modo, se observa en [36] que al fabricar mezclas para morteros con inclusión de PET, PC, ABS y POM como reemplazo de arena natural en porcentajes de 5, 15 y 20%, para determinar resistencias a cambios cíclicos en temperatura y humedad, resistencia a la cristalización de sal, a la congelación y descongelación, han determinado su bajo daño por acción de heladas atribuible al aumento de porosidad de estos Agregados Plásticos (PA), también sobresalientes resistencias a la compresión, de manera similar resaltan que en plásticos POM y PET existe mejoría en la expansión diferencial entre el plástico y la matriz del cemento a causa de su cristalina naturaleza, además las propiedades físicas de estas mezclas están por encima de requisitos mínimos exigidos para hormigón ligero estructural (17 MPa), lo cual es coherente con lo mencionado por [37], quienes reafirman estos mismos resultados en sus mezclas de Plástico Reciclado (LLDPE) con arena de dunas rojas en un 30 y 70% como agregado en la fabricación de Hormigón Elaborado Con Áridos Plásticos Reciclados, se reportaron asentamientos más bajos en 11-23% (25-50 mm) en comparación con el Agregado Ligero Volcánico Convencional (LWC) y con adiciones de 25 al 100%. De manera similar,

en [38] han unido a sus mezclas de hormigones, Poliestireno Reciclado Termoplástico (rPS) y Polipropileno Reciclado (rPP), lavados y triturados en tamaños de 0.297 y 2.38 mm, para

curarlos térmicamente durante 1h 45min, se demostró que la mezcla rPS ha tenido una resistencia a la compresión rápidamente mayor, además rPS y rPP, frente a las mezclas de referencia, presentaron menos susceptibilidad al daño generado por la humedad y sensibilidad térmica menor, afirman también sus autores que en estas mezclas, se observan propiedades mecánicas óptimas para aplicación en pavimentos livianos y especiales como aquellos requeridos en climas cálidos, pistas de carretera, acabados de paredes, tabiques, superficies y cubiertas de puentes, estética y decoración de construcción, análogamente aconsejan para futuros estudios, una gradación adecuada de agregados, pruebas de rendimiento como tendencia a la formación de surcos y de fatiga, y contenido óptimo de mezcla en Concreto De Plástico Reciclado Termoplástico (TRPC). De acuerdo a la investigación de [39], se menciona que para el reforzamiento de mortero han utilizado una mezcla de fibras alambradas de PP virgen y envasado de césped artificial como referencia, para compararlas con refuerzo formados por PET-PE cilíndricas de longitud 1cm y diámetro 0.70 mm, y otro de PE-PP aplanadas con longitudes entre 10 y 40 mm, tratadas con un revestimiento de sílice sol-gel rápido para obtener mayor fortalecimiento de la unión en interfase de la matriz circundante del mortero y la armadura fibrosa, todas las mezclas han sido realizadas con OPC y curadas por 21 días en cámara climática fundada en Peltier (20°C y 65 ± 5% RH), se determinó además que las fibras cilíndricas y aplanadas mejoran las respuestas de energía disipada en caso de falla y mecánica del compuesto en términos de carga máxima, catalogando el tratamiento como rápida solución eficaz y viable, que aumenta capacidades de disipación del Cemento Reforzado Con Fibra (FRCC), induciendo fuertes actitudes

hidrófilas de la fibra en su superficie debido a que el revestimiento de sílice promueve relevantemente la adhesión en interfase entre el matriz de cemento y el refuerzo en la etapa de extracción. Según [40], en los resultados de sus trabajos realizados sobre el uso de variedad de plásticos utilizados para la fabricación de materiales viables de construcción con inclusión de diferentes tipos de PW, concluyen que la utilización de fibras plásticas en materiales a base de cemento aumenta las resistencias a la tracción y al encogimiento, aunque reduce la resistencia a la compresión, lo cual es coherente con los resultados obtenidos por [41] en sus investigaciones con inclusión de Residuos De Plásticos Electrónico (WEP), así mismo aconsejan para evitar la formación de bolas, se debería agregar menos de 1.5% en su contenido como agregado y favorecer aún más la tracción, de la misma manera los agregados plásticos se han incluido para sustituir agregados finos y gruesos, reduciendo así el peso de los materiales, la densidad y aumento en la porosidad, recomiendan además los autores, hallar métodos que permitan tratar eficazmente la superficie de plástico pulverizado.

Ladrillos

Algunos estudios se han ocupado de hallar el uso de algunos PW para la fabricación de materiales de mampostería, como ladrillo, encontrando importantes hallazgos que evidencian la viabilidad que se obtiene con la inclusión de materiales como el PET, HDPE, LDPE, en el sector de la construcción.

Materiales de mampostería con inclusión de pw

En este marco de investigaciones, por su parte [42] después de la trituración de HDPE y PET utilizados como aditivos poliméricos,

lo han incluido como parte de la mezcla de ladrillo sin coser en proporciones de 0, 1, 3, 7, 15 y 20% por peso, calentando la mezcla durante 15 minutos a 300°C, hallando incremento de ganancia en el rendimiento térmico, logrando una conductividad térmica entre 0,18 W/mk y 0,20 W/mk, mientras que la mezcla control ha presentado 0,48 W/mk y mejoradas propiedades térmicas, con granos aditivos de tamaño entre 3 y 6 mm, así mismo en términos de capacidad calorífica específica han logrado un rango de 85 y 90% frente a la mezcla control. Para definir su durabilidad y el desempeño de su resistencia, en [43] con distintas molaridades de ácido sulfúrico, 4.6E-02, 3.6E-03, 5.2E-04 y 2.3E-05 M, han sumergido ladrillos de mampostería, fabricados con PET y residuos triturados de vidrio reciclado, obteniendo ladrillos como elemento de mampostería de carga, con 30:70% y 40:60% de PET-Vidrio triturado, logrando 2.5 y 3 veces en resistencia a la compresión en comparación con ladrillos de arcilla roja, igualmente bajo carga de deformación axial se presenta una alta energía de disipación, esto último asociado a la ductilidad del ladrillo activada por las propiedades viscoelásticas de PET, adicionalmente se podría lograr el ahorro de costos de la explotación, transporte y trituración, frente al método convencional, en consecuencia haría llamativo fabricar este tipo de ladrillo, sumado a esta forma de eliminar residuos de PET. Similarmente, en estudios de [44] referidos a la obtención de ladrillos, han realizado mezclas de arena con bolsas de LDPE moldeada continuamente mediante un procedimiento sencillo, obteniendo un material relativamente liviano y duradero, debido a la influencia por el tamaño de las partículas de arena y las proporciones de esta y LDPE, las propiedades mecánicas se presentan adecuadas para alcanzar la máxima resistencia a la compresión “75%”, la adición de arena debe ser del 75% en peso, así mismo en esta última prueba, las mezclas se presentan dúctiles

con una proporción de arena no mayor a 75%, esta mezcla se utiliza en la actualidad en materiales como tabiques y tejas de techo. En otros métodos utilizados, se aprecia el uso de PET en cantidades de 5, 10, 15, y 20 kg, lavado con agua doméstica y secado al ambiente, para incluirse en la mezcla de arcilla de laterita en proporciones de 100kg, para la fabricación de ladrillos cocidos, con temperaturas requeridas de horno de 900°C para su elaboración, alcanzando la fundición de PET al conseguir una temperatura de 250°C, cuando su porcentaje de inclusión en la mezcla ha sido mayor del 10% presentándose el colapso de estos elementos, con porcentajes menores de 10% los ladrillos se han deformado, ya para los ladrillos con inclusión del 5% han alcanzado resultados precisos de eficiencia estructural en comparación con la muestra de referencia, en visto de lo anterior los autores han recomendado controlar la temperatura de cocción con la inclusión del 5%, pudiéndose presentar buenas funciones, pero señalan además, efectuar más investigaciones al respecto [45].

Diversidad en materiales y usos con inclusión de pw

Otros Estudios realizados con el objetivo de incorporar PW en la utilización de materiales con fines geotécnicos de aumentar las características del suelo, se logró evidenciar la utilización de materiales como PET y Finos Plásticos (FC).

Reforzamiento de arcillas limosas con inclusión de pw

Estos estudios y por medio de inclusión de PET fino triturado, en porcentajes de 10, 20, y 30% y en forma de escamas en porcentajes de 3 y 5% en sus mezclas con suelos arcilloso, se observaron la degradación de la resistencia del suelo arcilloso para las mezclas con material fino, así mismo en las pruebas

de compactación estándar se ha reducido el contenido de agua y los valores de peso seco de la mezcla, aunque estos finos han permitido un llenado de vacíos significativo, ya para las escamas el contenido de humedad se ha apreciado con un valor alto, además las mezclas de finos con 70% de suelos y 30% PET, y 95% de suelos y 5% escamas, han obtenido mejoría de los resultados de capacidad de carga [46]. De igual manera, se observa como en estudios de [47] han unido FC con arena natural, para luego apisonarlos en seco, posteriormente saturarlos en agua desaireada durante 24-48 h, dicha muestra saturada, se ha consolidado bajo presión de confinamiento efectivo para determinar la relación de amortiguamiento y el módulo de corte cambiando de manera no lineal con incremento de FC, este módulo ha alcanzado, con la mezcla de arena local, natural Taiyuan/arena fina y FC al 30% y 0%, su punto mínimo y máximo respectivamente, además afirman sus autores que con la adición de FC se aprecia un incremento en la relación de amortiguación del material. De manera similar, se observa en trabajos de [48], la realización de técnicas de estabilización de suelo con materiales de difícil degradación, han determinado que la inclusión de PW permite obtener significativos resultados en pruebas CBR, UCS, resistencia máxima, capacidad de carga del suelo, mejoramiento del ángulo de fricción, y además reducción de la cohesión, compresibilidad y asentamiento.

Reforzamiento de taludes con inclusión de pw

Los Pasadores Plásticos Reciclados (RPP) han logrado establecerse como un material resistente, fiable y viable que permiten reducir considerablemente asentamientos frente a zona de referencia, de igual manera presentes en forma de pilotes han arrojado importantes hallazgos.

Estos materiales en la estabilización de taludes y reforzamiento de terraplenes han

presentado óptimos resultados, como en estudios realizados por [49], quienes ratifican como una alternativa rentable el uso de RPP para la estabilización de pendientes y taludes, a los cuales por medio de pruebas de resistencia a la flexión de 3 puntos “ASTM D790” han presentado valores entre 21.4 Y 32.4 MPa y modulo elástico entre 1310 y 1380 MPa, logrando evidenciar que dichos RPP instalados a poca distancia entre si logran menores asentamientos en la parte alta de los taludes (cresta), además reportan que la instalación de 1 RPP se efectúa en cuatro minutos y 120 en un día. De manera semejante, importantes hallazgos observados por [50], quienes en el reforzamiento de un terreno de 6x7.5 m han utilizado un total de 64 RPP con tamaño de 3x0.15x0.15 m, para luego sobrecargarlo con material apisonado de arenas limosas con una altura de 1.2 m, encontrando un asentamientos máximo de 52 mm en la zona control y 23 mm en la zona reforzada con RPP, siendo la disminución del asentamiento del 56% en el tramo reforzado en comparación con la zona control, igualmente han evidenciado que la presión ejercida sobre los RPP frente a la presión sobre el suelo es más alta, esto indicaría un mecanismo eficaz de transferencia de carga de los RPP, dicen además sus autores, que no ha sido uniforme el perfil de asentamiento de la sección de control.

Conclusiones

Al concluir el presente trabajo de investigación, se puede evidenciar como la necesidad de eliminar desechos plásticos ha generado preocupación en el mundo de la investigación, con fines de incluir estos desechos en materiales usados día a día a nivel mundial, logrando evidenciar la viable utilización de estos. Se presentan características necesarias al momento de realizar mezclas de estos con materiales convencionales, de igual manera, se cumplen parámetros establecidos internacionalmente

que hacen de estos materiales PET, LLDPE, LDPE, HDPE, PE, PC, ABS, PP entre otros, atractivos elementos de estudio, con resultados finales satisfactorios, que buscan y cumplen el objetivo de ser amigables con el medio ambiente, dando reutilización a estos PW, así mismo se plantea la necesidad de ahondar en este tema para estudios futuros, ya que al ser un tema de investigación reciente aún no posee investigaciones suficientes que garanticen una vida útil prolongada a largo plazo, aunque muchos de ellos han logrado satisfacer ciertos niveles, requisitos y parámetros estandarizados.

Agradecimientos

En el caso del autor Saieth Baudilio Chaves Pabón, se menciona que es producto resultado de su ejercicio académico como profesor de la Universidad Militar Nueva Granada. Adicionalmente, los autores dan crédito a la Universidad Militar Nueva Granada por el apoyo recibido en el desarrollo de esta investigación y en la realización de este documento científico.

Referencias

- [1] I. S. Oberoi, P. Rajkumar, and S. Das, "Disposal and recycling of plastics," *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.562.
- [2] W. Ferdous et al., "Resources , Conservation & Recycling Recycling of landfill wastes (tyres , plastics and glass) in construction – A review on global waste generation , performance , application and future opportunities," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 173, no. May, p. 105745, 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105745.
- [3] H. T. Mohan, K. Jayanarayanan, and K. M. Mini, "Recent trends in utilization of plastics waste composites as construction materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 271, p. 121520, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121520.
- [4] M. S. Ranadive, H. P. Hadole, and S. V. Padamwar, "Performance of Stone Matrix Asphalt and Asphaltic Concrete Using Modifiers," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 30, no. 1, p. 04017250, 2018, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002107.
- [5] S. T. Azeko, K. Mustapha, E. Annan, O. S. Odusanya, and W. O. Soboyejo, "Recycling of Polyethylene into Strong and Tough Earth-Based Composite Building Materials," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 28, no. 2, p. 04015104, 2016, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001385.
- [6] F. K. Alqahtani, M. I. Khan, G. Ghataora, and S. Dirar, "Production of Recycled Plastic Aggregates and Its Utilization in Concrete," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 29, no. 4, p. 04016248, 2017, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001765.
- [7] H. H. Mhanna, R. A. Hawileh, W. Abuzaid, M. Z. Naser, and J. A. Abdalla, "Experimental Investigation and Modeling of the Thermal Effect on the Mechanical Properties of Polyethylene-Terephthalate FRP Laminates," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 32, no. 10, p. 04020296, 2020, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003389.
- [8] D. V. Marques et al., "Recycled polyethylene terephthalate-based boards for thermal-acoustic insulation," *J. Clean. Prod.*, vol. 189, pp. 251–262, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.04.069.
- [9] F. Liu, Y. Yan, L. Li, C. Lan, and G. Chen, "Performance of Recycled Plastic-Based Concrete," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 27, no. 2, 2015, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000989.

- [10] E. Yaghoubi, A. Arulrajah, Y. C. Wong, and S. Horpibulsuk, “Stiffness Properties of Recycled Concrete Aggregate with Polyethylene Plastic Granules in Unbound Pavement Applications,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 29, no. 4, p. 04016271, 2017, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001821.
- [11] K. A. Wiswamitra, S. M. Dewi, M. A. Choiron, and A. Wibowo, “Heat resistance of lightweight concrete with plastic aggregate from PET (polyethylene terephthalate)-mineral filler,” *AIMS Mater. Sci.*, vol. 8, no. 1, pp. 99–118, 2021, doi: 10.3934/MATERSCI.2021007.
- [12] G. Kaur and S. Pavia, “Chemically treated plastic aggregates for eco-friendly cement mortars,” *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, no. 0123456789, 2021, doi: 10.1007/s10163-021-01235-2.
- [13] C. Maalouf et al., “An energy and carbon footprint assessment upon the usage of hemp-lime concrete and recycled-PET façades for office facilities in France and Italy,” *J. Clean. Prod.*, vol. 170, pp. 1640–1653, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.10.111.
- [14] R. P. Borg, O. Baldacchino, and L. Ferrara, “Early age performance and mechanical characteristics of recycled PET fibre reinforced concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 108, pp. 29–47, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.029.
- [15] A. S. Esfandabad, S. M. Motevalizadeh, R. Sedghi, P. Ayar, and S. M. Asgharzadeh, “Fracture and mechanical properties of asphalt mixtures containing granular polyethylene terephthalate (PET),” *Constr. Build. Mater.*, vol. 259, p. 120410, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120410.
- [16] J. Thorneycroft, J. Orr, P. Savoikar, and R. J. Ball, “Performance of structural concrete with recycled plastic waste as a partial replacement for sand,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 161, pp. 63–69, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.127.
- [17] G. O. Bamigboye, K. Tarverdi, E. S. Wali, D. E. Basse, and K. J. Jolayemi, “Effects of Dissimilar Curing Systems on the Strength and Durability of Recycled PET-Modified Concrete,” *Silicon*, 2021, doi: 10.1007/s12633-020-00898-0.
- [18] P. Górak, P. Postawa, and L. N. Trusilewicz, “Lightweight composite aggregates as a dual end-of-waste product from PET and anthropogenic materials,” *J. Clean. Prod.*, vol. 256, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120366.
- [19] G. Martínez-Barrera, L. Ávila-Córdoba, F. Ureña-Núñez, M. A. Martínez, F. P. Álvarez-Rabanal, and O. Gencel, “Waste Polyethylene terephthalate flakes modified by gamma rays and its use as aggregate in concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 268, no. xxxx, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121057.
- [20] F. A. Spósito et al., “Incorporation of PET wastes in rendering mortars based on Portland cement/hydrated lime,” *J. Build. Eng.*, vol. 32, no. January, 2020, doi: 10.1016/j.job.2020.101506.
- [21] N. Shah, V. Mavani, V. Kumar, M. Mungule, and K. K. R. Iyer, “Impact Assessment of Plastic Strips on Compressive Strength of Concrete,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 31, no. 8, p. 04019148, 2019, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002784.
- [22] G. Singh and R. Chauhan, “A Study on using Plastic Coated Aggregate for evaluation of modified Bituminous

- Concrete Mix,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 955, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/955/1/012052.
- [23] B. S. Al-Tulaian, M. J. Al-Shannag, and A. R. Al-Hozaimy, “Recycled plastic waste fibers for reinforcing Portland cement mortar,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 127, pp. 102–110, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.131.
- [24] M. O. Kim, H. K. Lee, and H. K. Kim, “Cost and environmental effects of ocean-borne plastic flakes in cement mortar considering equivalent-strength mix design,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 291, p. 123267, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123267.
- [25] N. K. Bui, T. Satomi, and H. Takahashi, “Recycling woven plastic sack waste and PET bottle waste as fiber in recycled aggregate concrete: An experimental study,” *Waste Manag.*, vol. 78, pp. 79–93, 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2018.05.035.
- [26] T. K. M. Ali, N. Hilal, R. H. Faraj, and A. I. Al-Hadithi, “Properties of eco-friendly pervious concrete containing polystyrene aggregates reinforced with waste PET fibers,” *Innov. Infrastruct. Solut.*, vol. 5, no. 3, 2020, doi: 10.1007/s41062-020-00323-w.
- [27] M. Nematzadeh and M. Mousavimehr, “Residual Compressive Stress–Strain Relationship for Hybrid Recycled PET–Crumb Rubber Aggregate Concrete after Exposure to Elevated Temperatures,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 31, no. 8, p. 04019136, 2019, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002749.
- [28] X. Xu et al., “Sustainable Practice in Pavement Engineering through Value-Added Collective Recycling of Waste Plastic and Waste Tyre Rubber,” *Engineering*, vol. 7, no. 6, pp. 857–867, 2021, doi: 10.1016/j.eng.2020.08.020.
- [29] A. Arulrajah, S. Perera, Y. C. Wong, S. Horpibulsuk, and F. Maghool, “Stiffness and flexural strength evaluation of cement stabilized PET blends with demolition wastes,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 239, p. 117819, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117819.
- [30] S. Perera, A. Arulrajah, Y. C. Wong, S. Horpibulsuk, and F. Maghool, “Utilizing recycled PET blends with demolition wastes as construction materials,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 221, pp. 200–209, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.047.
- [31] S. İpek, A. Diri, and K. Mermerdaş, “Recycling the low-density polyethylene pellets in the pervious concrete production,” *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 23, no. 1, pp. 272–287, 2021, doi: 10.1007/s10163-020-01127-x.
- [32] W. F. Tang, S. L. Mak, and C. H. Li, “Sustainable management on recycling waste plastic in polymer-modified asphalt pavement and roads,” *ISPCE-CN 2020 - IEEE Int. Symp. Prod. Compliance Eng.* 2020, pp. 28–31, 2020, doi: 10.1109/ISPCE-CN51288.2020.9321859.
- [33] T. Ozbakkaloglu, L. Gu, and A. Gholampour, “Short-Term Mechanical Properties of Concrete Containing Recycled Polypropylene Coarse Aggregates under Ambient and Elevated Temperature,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 29, no. 10, p. 04017191, 2017, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002046.
- [34] M. Małek, W. Łasica, M. Kadela, J. Kluczyński, and D. Dudek, “Physical and mechanical properties of polypropylene

- fibre-reinforced cement–glass composite,” *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 3, pp. 1–19, 2021, doi: 10.3390/ma14030637.
- [35] M. A. Dalhat, H. I. Al-Abdul Wahhab, and K. Al-Adham, “Recycled Plastic Waste Asphalt Concrete via Mineral Aggregate Substitution and Binder Modification,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 31, no. 8, p. 04019134, 2019, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002744.
- [36] G. Kaur and S. Pavia, “Durability of Mortars Made with Recycled Plastic Aggregates: Resistance to Frost Action, Salt Crystallization, and Cyclic Thermal–Moisture Variations,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 33, no. 2, p. 04020450, 2021, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003566.
- [37] F. K. Alqahtani, G. Ghataora, M. I. Khan, and S. Dirar, “Novel lightweight concrete containing manufactured plastic aggregate,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 148, pp. 386–397, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.011.
- [38] M. A. Dalhat and H. I. Al-Abdul Wahhab, “Properties of Recycled Polystyrene and Polypropylene Bounded Concretes Compared to Conventional Concretes,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 29, no. 9, p. 04017120, 2017, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001896.
- [39] C. Signorini and V. Volpini, “Cemento Reforzado Con Fibra (FRCC),” *Fibers*, vol. 9, no. 3, pp. 1–15, 2021, doi: 10.3390/fib9030016.
- [40] J. K. Park and M. O. Kim, “Mechanical properties of cement-based materials with recycled plastic: A review,” *Sustain.*, vol. 12, no. 21, pp. 1–21, 2020, doi: 10.3390/su12219060.
- [41] B. Balasubramanian, G. V. T. Gopala Krishna, V. Saraswathy, and K. Srinivasan, “Experimental investigation on concrete partially replaced with waste glass powder and waste E-plastic,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 278, p. 122400, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122400.
- [42] H. Limami, I. Manssouri, K. Cherkaoui, M. Saadaoui, and A. Khaldoun, “Thermal performance of unfired lightweight clay bricks with HDPE & PET waste plastics additives,” *J. Build. Eng.*, vol. 30, 2020, doi: 10.1016/j.job.2020.101251.
- [43] A. F. Ikechukwu and C. Shabangu, “Strength and durability performance of masonry bricks produced with crushed glass and melted PET plastics,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 14, p. e00542, 2021, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00542.
- [44] A. Kumi-Larbi, D. Yunana, P. Kamsouloum, M. Webster, D. C. Wilson, and C. Cheeseman, “Recycling waste plastics in developing countries: Use of low-density polyethylene water sachets to form plastic bonded sand blocks,” *Waste Manag.*, vol. 80, pp. 112–118, 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2018.09.003.
- [45] J. O. Akinyele, U. T. Igba, and B. G. Adigun, “Effect of waste PET on the structural properties of burnt bricks,” *Sci. African*, vol. 7, p. e00301, 2020, doi: 10.1016/j.sciaf.2020.e00301.
- [46] N. dos S. L. Louzada, J. A. C. Malko, and M. D. T. Casagrande, “Behavior of Clayey Soil Reinforced with Polyethylene Terephthalate,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 31, no. 10, p. 04019218, 2019, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002863.
- [47] K. Cheng, J. Zhang, Y. Miao, B. Ruan, and T. Peng, “The effect of plastic fines on the shear modulus and damping ratio

- of silty sands,” *Bull. Eng. Geol. Environ.*, vol. 78, no. 8, pp. 5865–5876, 2019, doi: 10.1007/s10064-019-01522-1.
- [48] A. Iravanian and A. B. Haider, “Soil Stabilization Using Waste Plastic Bottles Fibers: A Review Paper,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 614, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1755-1315/614/1/012082.
- [49] M. S. Khan, S. Hossain, and G. Kibria, “Slope Stabilization Using Recycled Plastic Pins,” *J. Perform. Constr. Facil.*, vol. 30, no. 3, p. 04015054, 2016, doi: 10.1061/(asce)cf.1943-5509.0000809.
- [50] M. A. Islam, M. S. Hossain, F. F. Badhon, and P. Bhandari, “Performance Evaluation of Recycled-Plastic-Pin-Supported Embankment over Soft Soil,” *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 147, no. 6, p. 04021032, 2021, doi: 10.1061/(asce)gt.1943-5606.0002528.