

Beneficios de la incorporación de residuos plásticos en mezclas asfálticas: una revisión sistemática.

Ing. David Alonso Sepúlveda-Valdez ^A, Dr. Julio Alberto Calderón-Ramírez ^B, M.I. Ricardo Cota-Ramírez ^C, Dr. Marco Antonio Montoya-Alcaraz ^D.

^a Universidad Autónoma de Baja California, sepulveda.david@uabc.edu.mx, Mexicali, Baja California, México ^A.

^b Universidad Autónoma de Baja California, julio.calderon@uabc.edu.mx, Mexicali, Baja California, México ^B.

^c Universidad Autónoma de Baja California, ricardo.cota@uabc.edu.mx, Mexicali, Baja California, México ^C.

^d Universidad Autónoma de Baja California, marco.montoya@uabc.edu.mx, Mexicali, Baja California, México ^D.

Resumen

En el mundo los plásticos son unos de los residuos industriales más contaminantes que hay. Existe una gran cantidad de estos polímeros, resaltando entre ellos el tereftalato de polietileno (PET) y el polietileno de baja densidad (LDPE). Debido a esta situación se han propuesto soluciones para poder disminuir la cantidad de contaminación de este material al introducir el plástico en las mezclas asfálticas con el fin de poder disminuir el contaminante y brindar propiedades diferentes en los pavimentos. Este trabajo analiza los residuos plásticos más usados en la mezcla asfáltica y junto con sus porcentajes de remplazo sobre las mismas. Mediante una recolección de literatura utilizando la metodología The Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA/ScR), la cual consiste en un listado de requisitos que deben cumplir los elementos bibliográficos, con el fin de ver los resultados obtenidos en los estudios y saber la manera en que interactúa el plástico con las mezclas asfálticas. Se determinó que el plástico PET es el más utilizado por su facilidad de moldeo en las mezclas asfálticas, brindando propiedades efectivas de un mayor flujo, resistencia, tiempo de vida, estabilidad y rigidez. Entendiendo que este es un proceso sustentable que apoya al medio ambiente y las infraestructuras carreteras.

Palabras clave: Mezcla asfáltica, revisión sistemática, polímeros, residuos plásticos, resistencia.

Abstract

In the world, plastics are one of the most polluting industrial waste that exists. There is a large number of these polymers, highlighting among them Polyethylene Terephthalate (PET) and Low Density Polyethylene (LDPE). Due to this situation, solutions have been proposed to reduce the amount of contamination of this material by introducing the plastic in the asphalt mixtures in order to reduce the pollutant and provide different properties in the pavements. This work aims to analyze the plastic waste most used in the asphalt mix and together with their replacement percentages on them. Through a systematic review using The Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA/ScR)

methodology, which consists of a list of requirements that the bibliographic elements must meet, in order to see the results obtained in the studies and know the way in which plastic interacts with asphalt mixtures. It was determined that PET plastic is the most widely used due to its ease of molding in asphalt mixtures, providing effective properties of greater flow, resistance, lifetime, stability and rigidity. Understanding this is a sustainable process that supports the environment and road infrastructure.

Keywords: Asphalt mix, endurance, plastic waste, polymers, systematic review.

1. INTRODUCCIÓN

Los pavimentos son estructuras de las vías terrestres formadas por una o más capas de materiales, que tienen como función el permitir el tránsito de vehículos brindando seguridad, comodidad y un costo óptimo de operación. Los pavimentos asfálticos o flexibles son aquellos construidos con materiales asfálticos y materiales granulares [1].

La idea de incorporar diversos materiales reciclados en las mezclas asfálticas es una propuesta innovadora que surge del alto nivel de contaminación plástica que requiere ser eliminada, el cual es un problema mundial importante, buscando brindar beneficios en los pavimentos y en el ambiente [2,3].

Existen revisiones literarias que buscan enfoques del asfalto y análisis de laboratorio del plástico en los pavimentos, buscando los desafíos actuales de usar este polímero como modificador ampliando el campo de uso de este recurso [4]. Aunado a esto existen estudios enfocados en el uso de un solo tipo de plástico con el fin de mejorar la resistencia a la fractura u otros aspectos utilizando un porcentaje de remplazo de PET como fibra o triturado reciclado en las mezclas [2,5,6] es por ello por lo que la idea de hacer un análisis de este tema es relevante para futuros estudios.

De igual manera, el reciclaje de los recursos plásticos y su incorporación en la construcción de caminos pueden brindar nuevas alternativas para problemas en el área de las mezclas asfálticas como la durabilidad y deficiencias de calidad en los agregados que componen la mezcla, con lo cual se busca hacer una revisión sistemática utilizando la metodología Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA/ScR) la cual ayuda a documentar de una manera más ordenada los documentos encontrados [7] y contestar la pregunta de investigación ¿De qué forma interactúan los plásticos con las mezclas asfálticas y que beneficios brindan?. Los resultados de esta investigación, permitirán identificar los plásticos más utilizados en las mezclas asfálticas, los porcentajes de remplazo utilizados y la mejora en su desempeño.

2. MÉTODO

La presente revisión sistemática se llevó a cabo mediante la metodología PRISMA/ScR; La cual consiste en un listado de requisitos que deben cumplir los elementos bibliográficos detectados en las bases de datos para poder presentar un informe de metaanálisis, en las etapas de identificación, identificación rápida (screening) e inclusión [7]. Su aplicación se enfocó en artículos de modificación de mezclas asfálticas con plásticos, mismas que pueden ser revisiones del estado del arte, investigaciones en estado experimental o en desarrollo en fuentes de información de diversas bases de datos tales como Google scholar, EBSCO, Scopus y Web of Science. A su vez estos documentos deberán pasar por criterios de selección de búsqueda como el tipo de documento, año de publicación y el idioma utilizado. Las estrategias para la búsqueda de los artículos, fue por las palabras claves para esta investigación; Asphalt mixture, asphalt pavemen, effect, plastic waste, resistance in mixture, temperatura.

2.1 Criterios de inclusión:

Los criterios de inclusión son usados para una correcta selección de documentos [7], en la presente revisión sistemática se usó en la selección de diversas bases de datos de los artículos científicos, journal y revisiones científicas en el idioma utilizado, publicados en la última década, 2012-2022, además que mencionen la adición de plásticos en las mezclas asfálticas, reporte del porcentaje de remplazo del plástico, así como beneficios que generan estos residuos al ser combinados.

2.2 Criterios de exclusión:

Los criterios de exclusión son aquellos que ayudan a un descarte de documentos innecesarios [7], estos aplican si el contenido del artículo se encuentra duplicado en algún documento ya incluido, además de la información presentada, si estos no presentan datos referentes al tema o algún resultado de utilidad de la incorporación del plástico en las mezclas asfálticas.

2.3 Cadena lógica:

Se utilizó la siguiente cadena lógica donde se buscará que siempre se incluyan las palabras efecto, plastic waste y deberá incluir las palabras asphalt pavement o asphalt mixture para obtener una búsqueda de documentos con mayor referencia. Effect AND plastic waste AND (asphalt pavement OR asphalt mixture)

La búsqueda más reciente se ha llevado a cabo el día 11 de noviembre de 2022 en las bases de datos Google scholar, EBSCO, Scopus y Web of Science. Las palabras claves fueron utilizadas para las diversas cadenas de búsquedas utilizadas donde se especificaba encontrar estas palabras en título o resumen.

3. RESULTADOS

3.1 Resultados de metodología PRISMA/ScR

La aplicación del método PRISMA/ScR, reveló un total de 4159 estudios. Estos estudios se encontraron utilizando 2 de las palabras clave; plastic waste y asphalt mixtures, una vez realizada la cadena lógica se buscó en las diversas bases de datos donde se obtuvo un total de 555 documentos a los cuales se les aplico los diversos criterios de inclusión y exclusión, dejándonos 157 documentos iniciales. Posterior al proceso de las cadenas de búsqueda en las diversas fuentes de información, todas las citas identificadas fueron descargadas en formato RIS (extensión de archivo) para posteriormente ser cargadas en el manejador de documentos Rayyan [8] para poder eliminar duplicados de estos documentos donde se detectaron 63 documentos duplicados de los cuales se eliminaron 35 dejando; EBSCO (n=21); Google Scholar (n=13); SCOPUS (n=51); Web of Science (n=37); Obteniendo así una “n” total de 122.

Después de la selección de estos documentos se procedido con la identificación rápida (screening) que consiste en una lectura breve de título y resumen de todos los documentos para determinar cuáles son los más apropiados para la lectura de texto completo, de estos se descartaron 77 documentos quedando una “n” de 48 documentos. Continuando con el proceso teniendo una “n” de 45 documentos para revisión de texto completo, los cuales fueron excluidos 20 dejándonos de esta forma una “n” final de 25 documentos para incluir tal como se muestra en la Figura 1.

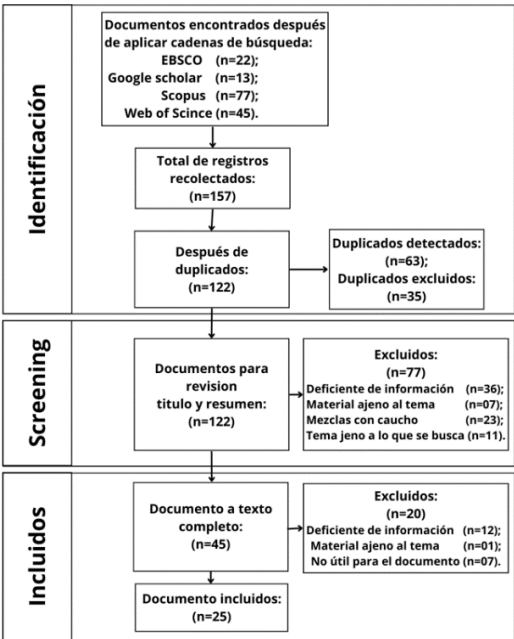


Fig. 1. Diagrama de flujo de la estrategia de búsqueda. Fuente: elaboración propia a partir de “[7]”.

Los 25 documentos restantes referentes a las fechas del 2013-2022 provienen de las diversas bases de datos EBSCO, Google Scholar, SCOPUS, Web of Science, tal como se muestra a continuación en la tabla 1.

Tabla 1. Bases de datos

Base de datos.	Cantidad de artículos.
EBSCO	03
Google Scholar	12
SCOPUS	08
Web of Science	02

Fuente: [2, 11-34].

3.2 Resultados de revisión de literatura

Por lo general existen 2 maneras de incorporar los residuos plásticos en las mezclas asfálticas estos pueden ser mediante el método seco es la implementación del ligante asfáltico combinado con el agregado realizando una mezcla homogénea y después se le sumara el residuo plástico como se muestra en la Fig.2. En el método húmedo en este el plástico se junta con el ligante asfáltico siendo un porcentaje del contenido de asfalto óptimo para posteriormente combinar los agregados pétreos tal como se muestra en la Figura 3. Para poder determinar un porcentaje de remplazo en las mezclas es fundamental conocer el estado del material que se trabajará y determinar el método de incorporación [9, 10].

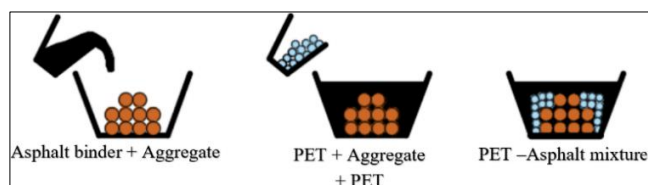


Fig. 2. Proceso seco

Fuente: elaboración propia a partir de “[9]”.

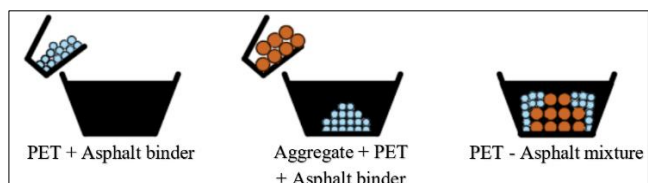


Fig. 3. Proceso húmedo

Fuente: elaboración propia a partir de “[9]”.

Con base en los resultados de los documentos se puede ver que el Tereftalato de polietileno (PET) es el que suele ser más utilizado, pero se opta por utilizar diferentes residuos plásticos para ampliar conocimientos y comparación de resultados como lo es; Polietileno de alta densidad (HDPE) [; Polietileno de baja densidad (LDPE); Polipropileno (PP); Elastómero termoplástico (TPE); Polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE); Plástico Film. Con base a esta información se sabe que entonces será importante tomar en cuenta el método de aplicación del plástico en la mezcla y el porcentaje de plástico ya sea utilizado como agregado, o como porcentaje de remplazo del contenido optimo del asfalto tal como en la Tabla 2.

Tabla 3. Plásticos métodos y porcentajes de adición del plástico

No.	Tipo de plástico	Método	% de sustitución
[11]	LDPE	Seco	17, 13, 7
[12]	LDPE	Seco	0, 5, 1
[13]	LDPE	Húmedo	0, 2, 4, 6
[14]	LDPE	Seco	2, 4, 6
[15]	LDPE, HDPE	Húmedo, seco	3, 6, 9 y 12
[16]	LDPE, PET	Húmedo	0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.0, 1.25
[17]	N/M	Húmedo	N/M
[18]	N/M	Seco	6
[19]	PET	Seco	0, 2, 4, 6
[2]	PET	Seco	10
[20]	PET	Seco	2, 4, 6, 8, 10
[21]	PET	Seco	6, 10, 18, 22
[22]	PET	Seco	0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1
[23]	PET	Seco	0, 5, 10, 15, 20
[24]	PET	Seco	2.5, 5.0, 7.5
[25]	PET	Seco	0, 10, 15, 20, 25, 30
[26]	PET	Seco	0.5, 1
[27]	PET	seco	2.5, 5.0, 7.5
[28]	PET	N/M	N/M
[29]	PET	N/M	N/M
[30]	PET	Húmedo	1, 2, 3, 5, 10
[31]	Plástico Film	Húmedo	6
[32]	PP	Húmedo	2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5
[33]	TPE	Húmedo	6
[34]	UHMWPE	Húmedo	2

Fuente: [2, 11-34]

3.2.1 LDPE

El uso del plástico LDPE en las mezclas asfálticas es efectivo brindando propiedades de estabilidad y mejora de la rigidez, en estos estudios se busca la posibilidad de utilizar las bolsas plásticas de desecho como una capa de agregado en las mezclas de asfalto caliente y determinar el efecto de la adición de este recurso sobre el comportamiento de la estabilidad Marshall la cual se encarga de mostrar la capacidad de resistencia de la mezcla asfáltica por surcos o empujones, variando el tamaño máximo nominal de agregado a través de pruebas de laboratorio. Donde se obtiene una tendencia a aumentar la estabilidad incrementando el LDPE brindando un mayor flujo, menor cantidad de vacíos de aire e incremento en la rigidez de la mezcla [11, 12].

3.2.2 PET:

Existen una gran variedad de documentos referentes al tema de incorporar residuos plásticos con mezclas asfálticas, el plástico PET es más utilizado tal como se ve en la Figura 4 debido a que es el material con mayor producción procedente

de botellas y a su característica, este puede sustituir tanto un porcentaje del asfalto como un porcentaje del peso del agregado y obtener un resultado que aumente la rigidez, tiempo de vida y una mayor estabilidad [13-22]. Este material suele incorporarse en tiras para que simulen una fibra en la mezcla, esta idea puede brindar una resistencia al agrietamiento de los pavimentos, donde dependerá de las dimensiones de los polímeros si se incorpora en la mezcla de manera adecuada [14].

3.2.3 Otros plásticos:

A diferencia del plástico LDPE y el PET existen otros residuos de este estilo que suelen ser utilizados para mejorar las mezclas tales como el PP en donde se investiga el uso potencial de los residuos plásticos como modificador para mejorar el desempeño de la mezcla asfáltica en caliente bajo la influencia de los efectos del agua que pueden afectar el curso superficial del pavimento flexible [32]. También están el plástico TPE en donde se comparó el efecto de los modificadores de ligantes plásticos residuales disponibles comercialmente sobre el fenómeno de envejecimiento de ligantes bituminosos y mezclas asfálticas, obteniendo como resultado que las adiciones de estos materiales dan como resultado un aumento en la rigidez del aglutinante después de un envejecimiento a corto plazo a medida que aumentaba el contenido de polímero [33]. Incluso el uso de los plásticos polietileno de ultra alto peso molecular UHMWPE, por sus siglas en inglés, que mira el potencial de agrietamiento por fatiga de las mezclas asfálticas, la aplicación de UHMWPE al 2% mejora significativamente de las probetas fabricadas con áridos de granito y caliza reduciendo la rigidez de las mezclas asfálticas, en donde aumento la adherencia del ligante asfáltico-árido, lo que incrementó la resistencia de las mezclas asfálticas al agrietamiento por fatiga [34].

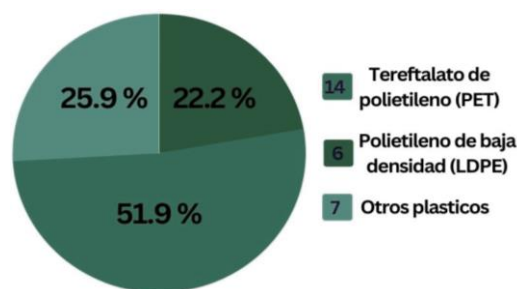


Fig. 4. Estadística de artículos en base a plásticos
Fuente: elaboración propia a partir de “[2, 11-34]”.

Tabla 4. Resultados por artículo

No.	Resultados principales
[2]	La resistencia al agrietamiento dependerá de las dimensiones del plástico
[11]	Mayor flujo, menor cantidad de vacíos, mejora de estabilidad y rigidez
[12]	Mejora al daño por humedad, mayor resistencia a la tracción, disminución en la deformación permanente
[13]	Mejor resistencia, aumento de rigidez, mejora elasticidad de asfalto

[14]	Disminución a la fluencia por daño
[15]	Se determina que el método húmedo es mejor, menor sensibilidad al daño por humedad
[16]	Cambios en la estabilidad
[17]	Mejora a la rigidez
[18]	Mejora la resistencia a la fractura
[19]	Obtención de mayor resiliencia, menor tiempo de envejecimiento
[20]	Mejora el comportamiento a la fatiga
[21]	Mayor estabilidad, fluidez y con menor rigidez
[22]	Mayor resistencia contra la deformación
[23]	Mejor adherencia, mejor resistencia al daño por humedad
[24]	Mayor resistencia a la deformación, menor flujo
[25]	Tiende a aumentar la resistencia y se encuentra que el diseño optimo en seco puede ser con 15 % de remplazo
[26]	Mejora la fractura y la formación de surcos
[27]	El uso del material más grueso da una mayor densidad
[28]	Se determina la obtención de mezclas más rígidas
[29]	Aumento a la resistencia, deformación permanente, mejora en la rigidez
[30]	Estudio que apoya en el entendimiento del tema y mejora de datos
[31]	Se concluye que las mezclas asfálticas tibias que incorpora residuos plásticos es una solución prometedora para infraestructuras viales de volumen de tráfico bajo a intermedio
[32]	Se concluye que se ha deducido una mejora de las propiedades físicas de los especímenes de mezcla de propileno y asfalto en comparación con los especímenes de asfalto convencionales en proporciones óptimas
[33]	Aumento a la rigidez por aglutinante, envejecimiento a corto plazo mediante se aumenta el polímero
[34]	Reducción de la rigidez, Incremento a la adherencia del ligante árido generando un incremento la resistencia de las mezclas por fatiga.

Fuente: [2, 11-34]

4. DISCUSIÓN

El objetivo de esta investigación es analizar los plásticos más utilizados en la mezcla asfáltica junto con sus porcentajes de remplazo. Realizando una recolección de literatura usando la metodología PRISMA/ScR; para obtener los documentos más relevantes del tema, con el fin de ver los resultados obtenidos, además de identificar como interactúa el plástico con las mezclas asfálticas.

Los resultados del desarrollo de esta investigación permitieron determinar que las combinaciones de los asfaltos con los residuos plásticos generen un aumento en la resistencia de los pavimentos, dependiendo del método de empleo seco o húmedo.

Para el desarrollo de esta investigación, se realizó un estudio y recolección de documentos especializados referentes a la adición de plásticos en las mezclas asfálticas, donde se obtuvo un total de 25 fuentes bibliográficas que eran los documentos más completos y que aportaban el porcentaje de sustitución y resultados de la resistencia, aumento de rigidez e incluso un mayor tiempo de vida del pavimento, estos resultados permiten responder la pregunta de investigación ¿De qué forma interactúan los plásticos con las mezclas asfálticas y que beneficios brindan?, los plásticos son problema global por sus afectaciones al medio ambiente, dichas afectaciones pueden disminuirse de diferentes maneras, el utilizarlo en los pavimentos puede ser como una opción viable y sustentable. Se logró determinar que el uso de estos residuos plásticos es benéfico, siendo los plásticos más usados, el PET y el LDPE tal como se muestra en la Fig.4. aportando estabilidad, resistencia a hundimientos, un mayor tiempo de vida entre otros puntos, comprendiendo que el efecto que causan en las mezclas es positivo tanto a nivel laboratorio, como a nivel social y ambiental, brindando un mejor entorno más sano y también carreteras más eficientes y duraderas.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El campo de la ingeniería civil se han realizado importantes hallazgos en la inclusión de los residuos plásticos en las mezclas asfálticas, con el fin de buscar soluciones para el problema ambiental generado por dichos residuos y la mejora de infraestructura carretera. Los resultados de esta investigación plantean una solución favorable y sustentable en la disposición de los residuos plásticos. Asimismo, permiten mejorar el desempeño de las mezclas asfálticas; principalmente en su durabilidad y resistencia a la fatiga.

El tipo de plástico empleado es uno de los puntos principales que se tienen que ver al momento de incorporarlos a las mezclas asfálticas, en la mayoría de los documentos recolectados se utiliza el PET y LDPE donde su incorporación mejora las propiedades de estas mezclas, determinando que el porcentaje de remplazo empleado mediante los métodos secos o húmedos impactara en el resultado de la mezcla.

Se determinó que con porcentajes bajos de reemplazo conservan las propiedades naturales de los materiales pétreos tal como se muestra en la Tabla 3. Los efectos que generan el agregar diferentes porcentajes de PET en las mezclas asfálticas modificadas aumentan la rigidez y a la vez entre mayor sea el contenido de este residuo el asfalto se acumula en las superficies de las partículas de residuos de PET.

En resumen, los principales hallazgos de esta revisión sistemática son:

- Los porcentajes óptimos de remplazo dependerán del método de adición y el tipo de mezcla que se busque pudiendo ser una forma de empleo húmeda o seca.
- Los plásticos más comúnmente utilizados para estos son el plástico PET y LDPE demostrando obteniendo

resultados de mejora en la adherencia, mejor resistencia al daño por humedad y una mayor rigidez.

- Los porcentajes más relevantes de adición son del 2, 5, 6, 14 y en algunos documentos el 15%, brindando los valores más significativos en la mejora de los pavimentos.
- El porcentaje óptimo de adición de PET del 14 % por partículas del agregado a través del proceso seco, obtiene una mejora en la resistencia a la fractura.
- El uso de polietileno utilizando un método de empleo húmedo en el asfalto del 2 % y el mantenimiento de la mezcla a temperatura elevada durante períodos breves pueden mejorar las propiedades de la mezcla asfálticas.
- Al incorporar los residuos plásticos se tiende a aumentar la resistencia y se encuentra que el diseño óptimo en seco el cual puede ser con 15 % de remplazo.
- Los principales beneficios del plástico en las mezclas son un incremento en la estabilidad, mayor fluidez y una menor rigidez.

En conclusión, las mezclas modificadas con cualquier polímero plástico tienden a interactuar en ellas como una capa adicional que sirve para cubrir vacíos, en los agregados funciona como una capa que los recubre, otorgando beneficios en la resistencia a la deformación, teniendo una mayor estabilidad y una menor fluidez. Esta investigación puede ayudar a futuros trabajos en las búsquedas de resultados e ideas de la combinación y mejora de mezclas asfálticas con plásticos.

6. REFERENCIAS

- [1] Yung Vargas, Y. W., Cordoba Maquilón, J. E., & Rondón Quintana, H. A. (2016). Evaluación del desgaste por abrasión de una mezcla drenante modificada con residuo de llanta triturada (GCR). *Tecnura*, 20(50), 106-118.
- [2] Ma, J., & Hesp, S. A. (2022). Effect of recycled polyethylene terephthalate (PET) fiber on the fracture resistance of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 342, 127944.
- [3] Duarte, G. M., & Faxina, A. L. (2021). Asphalt concrete mixtures modified with polymeric waste by the wet and dry processes: A literature review. *Construction and Building Materials*, 312, 125408.
- [4] Xu, F., Zhao, Y., & Li, K. (2022). Using waste plastics as asphalt modifier: A review. *Materials*, 15(1), 110.
- [5] Movilla-Quesada, D., Raposeiras, A. C., & Olavarria, J. (2019). Effects of recycled polyethylene terephthalate (PET) on stiffness of hot asphalt mixtures. *Advances in Civil Engineering*, 2019.
- [6] Ghabchi, R., Dharmarathna, C. P., & Mihandoust, M. (2021). Feasibility of using micronized recycled Polyethylene Terephthalate (PET) as an asphalt binder additive: A laboratory study. *Construction and Building Materials*, 292, 123377.
- [7] Asar, S. H., Jalalpour, S. H., Ayoubi, F., Rahmani, M. R., & Rezaeian, M. (2016). PRISMA; preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses. *Journal of Rafsanjan University of Medical Sciences*, 15(1), 68-80.

- [8] Mourad Ouzzani, Hossam Hammady, Zbys Fedorowicz, and Ahmed Elmagarmid. Rayyan — a web and mobile app for systematic reviews. *Systematic Reviews* (2016) 5:210, DOI: 10.1186/s13643-016-0384-4
- [9] Ben Zair, M. M., Jakarni, F. M., Muniandy, R., & Hassim, S. (2021). A brief review: application of recycled polyethylene terephthalate in asphalt pavement reinforcement. *Sustainability*, 13(3), 1303.
- [10] Silva, J. D. A. A. E., Rodrigues, J. K. G., de Carvalho, M. W., Lucena, L. C. D. F. L., & Cavalcante, E. H. (2018). Mechanical performance of asphalt mixtures using polymer-micronized PET-modified binder. *Road Materials and Pavement Design*, 19(4), 1001-1009.
- [11] Assefa, N. (2021). Evaluation of the effect of recycled waste plastic bags on mechanical properties of hot mix asphalt mixtures for road construction. *Sustainable Environment*, 7(1), 1957649.
- [12] Radeef, H. R., Abdul Hassan, N., Abidin, A. R. Z., Mahmud, M. Z. H., Yusoff, N. I. M., Idham Mohd Satar, M. K., & Warid, M. N. M. (2021). Enhanced dry process method for modified asphalt containing plastic waste. *Frontiers in Materials*, 8, 700231.
- [13] Hong, Z., Yan, K., Wang, M., You, L., & Ge, D. (2022). Low-density polyethylene/ethylene-vinyl acetate compound modified asphalt: Optimal preparation process and high-temperature rheological properties. *Construction and Building Materials*, 314, 125688.
- [14] Abduljabbar, N., Al-Busaltan, S., Dulaimi, A., Al-Yasari, R., Sadique, M., & Al Nageim, H. (2022). The effect of waste low-density polyethylene on the mechanical properties of thin asphalt overlay. *Construction and Building Materials*, 315, 125722.
- [15] Haider, S., Hafeez, I., & Ullah, R. (2020). Sustainable use of waste plastic modifiers to strengthen the adhesion properties of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 235, 117496.
- [16] Sukmawan, W., & Arifin, S. Effect of Adding Plastic Wasteldpe (Low Density Polyethylene) and Pet (Polyethylene Terephthalate) on the Behaviour of Stability Marshall Characteristics of Asphalt Concrete Mixture.
- [17] Jafar, J. J. (2016). Utilisation of waste plastic in bituminous mix for improved performance of roads. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(1), 243-249.
- [18] White, G., & Reid, G. (2018, April). Recycled waste plastic for extending and modifying asphalt binders. In *8th Symposium on Pavement Surface Characteristics (SURF 2018)*, Brisbane, Queensland, Australia (pp. 2-4).
- [19] Singh, P., & Swamy, A. K. (2019). Effect of aging level on viscoelastic properties of asphalt binder containing waste polyethylene. *International Journal of Sustainable Engineering*, 12(2), 141-148.
- [20] Modarres, A., & Hamed, H. (2014). Effect of waste plastic bottles on the stiffness and fatigue properties of modified asphalt mixes. *Materials & Design*, 61, 8-15.
- [21] Movilla-Quesada, D., Raposeiras, A. C., & Olavarria, J. (2019). Effects of recycled polyethylene terephthalate (PET) on stiffness of hot asphalt mixtures. *Advances in Civil Engineering*, 2019.
- [22] Moghaddam, T. B., Soltani, M., & Karim, M. R. (2014). Evaluation of permanent deformation characteristics of unmodified and Polyethylene Terephthalate modified asphalt mixtures using dynamic creep test. *Materials & Design*, 53, 317-324.
- [23] Ghabchi, R., Dharmarathna, C. P., & Mihandoust, M. (2021). Feasibility of using micronized recycled Polyethylene Terephthalate (PET) as an asphalt binder additive: A laboratory study. *Construction and Building Materials*, 292, 123377.
- [24] Choudhary, R., Kumar, A., & Murkute, K. (2018). Properties of waste polyethylene terephthalate (PET) modified asphalt mixes: dependence on PET size, PET content, and mixing process. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 62(3), 685-693.
- [25] Marquez, K. P., Arizala, C. V. D., Soriano, V. J., Barron, J. M. G., Florece, A. E. A., Caday, J. H. B., ... & Migo, V. P. (2021). Recycled Polyethylene Terephthalate as Reinforcement Additive of Asphalt Mixture for Pavement Application. *Philippine Journal of Science*, 150(3), 1061-1068.
- [26] Abu Abdo, A. M., & Jung, S. J. (2020). Investigation of reinforcing flexible pavements with waste plastic fibers in Ras Al Khaimah, UAE. *Road Materials and Pavement Design*, 21(6), 1753-1762.
- [27] Choudhary, R., Kumar, A., & Murkute, K. (2018). Properties of waste polyethylene terephthalate (PET) modified asphalt mixes: dependence on PET size, PET content, and mixing process. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 62(3), 685-693.
- [28] Vargas, C., & Hanandeh, A. E. (2022). Features Importance and Their Impacts on the Properties of Asphalt Mixture Modified with Plastic Waste: A Machine Learning Modeling Approach. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 1-28.
- [29] Bekhedda, A., & Merbouh, M. H. (2022). Recycling of plastic waste polyethylene terephthalate (PET) as a modifier in asphalt mixture: study of Creep-Recovery at Low, Medium, and Hot Temperatures. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 16(60), 438-450.
- [30] Gürü, M., Çubuk, M. K., Arslan, D., Farzanian, S. A., & Bilici, I. (2014). An approach to the usage of polyethylene terephthalate (PET) waste as roadway pavement material. *Journal of hazardous materials*, 279, 302-310.
- [31] Almeida, A., Capitão, S., Estanqueiro, C., & Picado-Santos, L. (2021). Possibility of incorporating waste plastic filmflakes into warm-mix asphalt as a bitumen extender. *Construction and Building Materials*, 291, 123384.
- [32] Awad, A. (2017). Utilization of waste plastics to enhance the performance of modified hot mix asphalt. *GEOMATE Journal*, 13(40), 132-139.
- [33] Hall, F., & White, G. (2021). The effect of waste plastics on the ageing phenomenon of bituminous binders and asphalt mixtures. *Materials*, 14(20), 6176.
- [34] Hamed, G. H., Pirbasi, M. H., & Pirbasi, Z. R. (2020). Investigating the effect of using waste ultra-high-molecular-weight polyethylene on the fatigue life of asphalt mixture. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 64(4), 1170-1180.