

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

**Revisión sistemática del uso de distintos tipos de desperdicio plástico como agregado en la mezcla de concreto.**

**Andrea Emilia Vizcaíno Soriano**

**Ingeniería Civil**

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito  
para la obtención del título de  
Ingeniera Civil

Quito, 29 de noviembre de 2022

# **UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

## **HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA**

**Revisión sistemática del uso de distintos tipos de desperdicio plástico como agregado en la mezcla de concreto.**

**Andrea Emilia Vizcaíno Soriano**

**Nombre del profesor, Título académico Miguel Andrés Moscoso, Ingeniero M.Sc.**

Quito, 29 de noviembre de 2022

## © DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Andrea Emilia Vizcaíno Soriano

Código: 00203610

Cédula de identidad: 1722103122

Lugar y fecha: Quito, 29 de noviembre de 2022

## **ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN**

**Nota:** El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

## **UNPUBLISHED DOCUMENT**

**Note:** The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

## **DEDICATORIA**

Quiero dedicar esta tesis a mis padres por siempre creer en mí e impulsarme a seguir mis sueños.

## RESUMEN

Esta revisión sistemática se propone evaluar los efectos de áridos plásticos en las propiedades de la mezcla de concreto. Para lograr esto, una investigación extensa de artículos científicos publicados en los últimos 10 años fue realizada. El análisis de dichos artículos indica que el uso de un bajo porcentaje de áridos plásticos no es perjudicial para las propiedades del concreto y pueden llegar a mejorar algunas de ellas. Ciertas medidas como confinamiento o adición de aditivos pueden compensar las pérdidas de resistencia y ayudar tanto a introducir a los áridos plásticos como un material alternativo constructivo como a proveer a la sociedad una útil forma de reciclar considerables cantidades de plástico. Entre las futuras aplicaciones potenciales del árido plástico se puede mencionar: aceras, revestimientos de canales, vigas o bloques huecos.

Palabras claves: árido plástico, concreto plástico, plástico, construcción sostenible, reciclaje.

## ABSTRACT

This systematic review aims at evaluating the effects of plastic waste aggregate on the properties in concrete mix. To accomplish this, extensive research of scientific articles, published in the last 10 years, regarding the effect of plastic waste aggregates was conducted. The analysis of those articles indicates that low volumes of plastic aggregate are not detrimental to the properties of concrete and may improve some of them. Certain measures like confinement and addition of admixtures can compensate strength loss and help introduce plastic aggregate concrete as an alternative construction material while providing to society a new useful way to recycle considerable quantities of plastic waste. Potential future applications of plastic aggregate concrete include sidewalks, canal lining, beams, or hollow blocks.

**Key words:** plastic aggregate, plastic concrete, plastic , sustainable construction, plastic recycling.

**Tabla de contenido**

|   |    |
|---|----|
| Introducción al Proyecto Integrador ..... | 10 |
| Marco Teórico .....                       | 12 |
| Resultados.....                           | 18 |
| Conclusiones.....                         | 31 |
| Referencias bibliográficas .....          | 33 |

## Índice de tablas

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1: Propiedades del concreto.....                                      | 16 |
| Tabla 2: Resumen de las categorías usadas para analizar los resultados..... | 19 |

## INTRODUCCIÓN AL PROYECTO INTEGRADOR

El tema escogido para esta tesis es uno que es bastante conocido sin embargo no es hablado con la regularidad e insistencia que requiere. Actualmente, en todas las partes del mundo, pero especialmente los países en vías al desarrollo, la contaminación por acumulación de plástico aumenta y aumentará exponencialmente dado a una falta de concientización tanto por parte de corporaciones, quienes son las mayores productoras de plástico, como del público en general. Para este tipo de problema tan grande, no es delusional pensar que pequeñas medidas pueden ayudar. Dado esto, este trabajo intenta ser parte de aquellas pequeñas medidas tratando el tema del plástico dentro de la industria de la construcción; más específicamente, el uso de áridos plásticos dentro de la mezcla de concreto.

La pedagogía aplicada en esta revisión sistemática fue una experiencia contribuyendo a mi experiencia en cuanto a recopilar, buscar, valorar y juzgar grandes cantidades de información. Dentro de la pedagogías usadas también se halla la asociada con empatía la cual permite a uno entender la cultura al igual que el contexto donde el problema se origina [71]. En este caso, si bien el plástico es una problemática global, la empatía está más dirigida tanto a generaciones futuras como a países en vías al desarrollo del sudeste asiático o África los cuales importan la mayor parte de desperdicio plástico de países desarrollados. Asimismo, el uso de la empatía ayuda a crear un estado de mentalidad y trae nuevo conocimiento en el proceso de definir el problema a tratar [71].

La selección del tema sobre el uso del desperdicio de plástico contribuyó en gran parte en mi formación como ingeniera civil sobretodo en dos grandes aspectos. El tema seleccionado contribuyó en mi capacidad y destreza para recopilar y juzgar eficientemente información buscada en internet lo cual es muy útil al momento de entrar al campo laboral. El segundo aspecto en el que esta tesis aportó a mi formación como profesional es el del interés por la parte investigativa que ofrece la carrera. A lo largo de la realización de la tesis, la cual consistió claramente en leer y recopilar grandes cantidades de investigación, pude darme cuenta de que todos conocimientos que se dan hoy por sentado o se consideran básicos provienen de varios años de investigaciones y arduos ensayos de laboratorios. Por último, otro aspecto al que contribuyó fue a mi selección de rama de especialización que he decidido seguir tras acabar el pregrado la cual es la construcción (y diseño) sostenible. Esta área abarca temas de sostenibilidad en la industria constructora tales como materiales alternativos, ciudades inteligentes, estructuras que no consumen tipos de energía tradicionales, entre otros. Además, el lugar a donde toda la industria constructiva mundial se dirige, poco a poco, es a la construcción sostenible. De modo que esta rama de especialización abarca gran potencial por explorar y un buen futuro.

## MARCO TEÓRICO

El plástico es, hoy en día, uno de los materiales más utilizados en muchas industrias logrando estar presente en todos los aspectos de la sociedad. Dormimos en almohadas rellenas de plástico, nos limpiamos los dientes con cepillos de plástico, escribimos en teclados de plástico, bebemos y comemos alimentos en envases de plástico: es imposible pasar un día sin encontrarnos con algún tipo de plástico [12]. Todos los plásticos modernos pertenecen a una clase química de materiales llamados polímeros. Son moléculas grandes, formadas por una cadena de moléculas más pequeñas que se repiten (monómeros). El proceso de combinación de estos monómeros mediante calor o presión se denomina polimerización [12]. Hay dos tipos de polimerizaciones. La primera se llama reacción de polimerización (o reacción de adición) es cuando un monómero se conecta con el siguiente (dímero) y el dímero con el siguiente (trímero) y así sucesivamente. Esto se consigue introduciendo un catalizador, que normalmente es un peróxido [13]. El segundo tipo de polimerización es la polimerización condensada. Incluye la unión de dos o más monómeros diferentes, mediante la eliminación de pequeñas moléculas como el agua. También requiere un catalizador para que se produzca la reacción entre monómeros adyacentes [13].

Entre los tipos de plásticos más comunes que se derivan de la polimerización por condensación -y también los que se tratarán en este artículo- está: el plástico de tereftalato de polietileno (PET) que se utiliza en el envasado de alimentos [14]. Por otro lado, los plásticos que provienen de la polimerización por adición son: Plástico de polipropileno (PP) que se utiliza ampliamente hoy en día en una serie de aplicaciones domésticas e industriales[15]; Plástico de polietileno (PE) que se utiliza comúnmente en los envases de plástico, como para las bolsas de comestibles o envolturas de plástico[16] ; Plástico de

polietileno de baja densidad (LDPE) que se utiliza en la fabricación de una amplia gama de productos, incluyendo bolsas de comestibles, envolturas de plástico y películas [17]; Plástico de polietileno de alta densidad (HDPE), que incluye productos como juguetes o muebles de exterior [17]; el plástico de cloruro de polivinilo (PVC), que está presente en tuberías y dispositivos médicos [18] y, por último, el plástico de acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), que se refiere al plástico utilizado en dispositivos tecnológicos antiguos, como los residuos de los viejos ordenadores, televisores y radios [19].

Existen tres opciones principales para el reciclaje de plásticos: el reciclaje mecánico, el reciclaje químico e incineración. El proceso de reciclaje mecánico incluye el lavado, la trituración, el secado y la clasificación. El producto final de este proceso son gránulos/pellets o escamas, que se utilizan para diversas aplicaciones [6]. Por otro lado, el reciclaje químico utiliza procesos químicos para descomponer el polímero en productos de valor añadido [28]. Este tipo de reciclaje implica muchas técnicas, como la quimólisis, pirólisis o el craqueo catalítico fluido [29]. Los principales problemas de la pirólisis de los residuos plásticos son la falta de disponibilidad y la calidad irregular de la materia prima, así como la clasificación ineficiente y, por tanto, costosa [33]. La última forma de reciclaje es la incineración del polímero para su recuperación energética. En este proceso, el polímero se incinera y se recupera cierta cantidad de energía en forma de calor. Por lo general, se trata de un proceso de "último recurso" cuando no se puede conseguir ninguna otra aplicación de valor añadido. La incineración de muchos plásticos también libera gases peligrosos y deja residuos tóxicos [28].

Uno de los usos más recientes e innovadores del plástico, en la industria de la construcción, es como sustituto de los áridos en las mezclas de hormigón. Estas mezclas, tradicionalmente, se componen de cemento Portland, áridos gruesos y finos, y agua [34]. La mayoría de las veces, también se utilizan aditivos. Los áridos representan entre el 60 y el 80% de la mezcla de hormigón [38]. Hay dos tipos de áridos: gruesos y finos. Los primeros se refieren a materiales granulares como la arena, la arena o la piedra; los agregados gruesos son cualquier partícula mayor de 0,19 pulgadas, pero generalmente oscilan entre 3/8 y 1,5 pulgadas de diámetro [37]. Por otro lado, los áridos finos son también materiales granulares que suelen incluir piedra o arena triturada con la mayoría de las partículas que pasan por un tamiz de 3/8 pulgadas [37]. La producción de ambos tipos de áridos comienza con su extracción de las arenas naturales o de los pozos de arena y grava o del dragado de los depósitos sumergidos [38]. A la extracción le sigue la trituración, el cribado, el lavado y, finalmente, la evaluación de los áridos. Por último, el último componente utilizado en la elaboración del hormigón es el agua la cual debe de ser potable [38].

Las diferentes mezclas de concreto pueden clasificarse de manera amplia en estructurales y no estructurales. Estas últimas se refieren a los hormigones con el fin de configurar volúmenes de material resistentes. Algunos ejemplos son los hormigones para aceras, y los hormigones para rellenos [39]; estas pueden utilizar arenas y gravas rodadas o arenas y se caracterizan por una baja resistencia a la compresión y, por tanto, un bajo contenido de cemento [39]. En cambio, el hormigón estructural se refiere a todos los tipos de hormigón utilizados en aplicaciones estructurales [40], como la construcción de edificios o puentes. Además, las mezclas de hormigón estructural deben cumplir requisitos estrictos [41]. Los hormigones estructurales también pueden subdividirse según el aditivo

que contengan, como la mezcla de hormigón superplastificante, que se caracteriza por mejorar las características de fluidez [42] o el hormigón auto-consolidante (HAC).

Las propiedades más comunes que se analizarán en este trabajo se muestran en la Tabla 1. Las 3 primeras propiedades corresponden a las propiedades mecánicas mientras que el resto pertenecen a las propiedades de durabilidad.

| <b>Propiedad</b>            | <b>Descripción</b>   |
|-----------------------------|--|
| Resistencia a la compresión | Propiedad esencial del hormigón que mide su capacidad para soportar cargas y se considera uno de los parámetros esenciales en el diseño del hormigón armado [2].   |
| Resistencia a la tracción   | Capacidad del hormigón para resistir la fuerza de tracción que se le aplica [3].   |
| Resistencia a la flexión    | Capacidad del hormigón para contrarrestar las cargas de flexión [2].   |
| Trabajabilidad              | Capacidad del hormigón recién mezclado para fluir sin segregarse; controla la resistencia y la durabilidad del hormigón [2].   |
| Coefficiente de sorptividad | Capacidad de los medios porosos para absorber agua por acción capilar. Proporciona una buena medida de la durabilidad del hormigón, ya que hay muchas sustancias químicas que pueden penetrar en la microestructura del hormigón desde los suelos [2]. |
| Resistencia a la abrasión   | Capacidad de la superficie del hormigón para contrarrestar las fuerzas de desgaste. La abrasión del hormigón permite que éste se   |

|                      |  |
|----------------------|--|
|                      | degrade con el paso del tiempo, reduciendo su tenacidad al hacerlo vulnerable a la intemperie [2]. |
| Sensibilidad térmica | Efecto de la temperatura en el comportamiento de las mezclas de hormigón.                          |
| Porosidad            | Medida de los espacios vacíos en el volumen de la mezcla de concreto [48].                         |
| Permeabilidad        | Capacidad del material para permitir el paso del agua [48].  |

*Tabla 1: Propiedades del concreto.*

La creciente cantidad de residuos plásticos se ha convertido en uno de los problemas medioambientales más preocupantes de las últimas décadas. El evidente contraste entre la notable durabilidad de los plásticos y su corto tiempo de servicio conduce a la creciente acumulación de residuos plásticos en el medio ambiente[1]. Asimismo, debido a la baja tasa de reciclaje de los residuos relacionados con el plástico,[2] se adoptan muchas medidas no respetuosas con el medio ambiente para la eliminación de este tipo de residuos. Por ejemplo, la quema de policloruro de vinilo (PVC) libera halógenos peligrosos y contamina el aire, lo que repercute en el cambio climático [3]. En cuanto a los vertederos de plástico, además de ser un acoso visual, tienden a obstruir los desagües, los canalones y los respiraderos de las aguas pluviales, creando así un escenario similar al de las inundaciones, incluso en caso de lluvias escasas. Además, también suponen un peligro para los animales callejeros que tienen muchas posibilidades de consumirlos [4]. La industria de la construcción, por otro lado, es responsable de una gran parte de los problemas medioambientales actuales, ya que es la segunda que más residuos genera, ya sea durante la construcción o la demolición [42]. Teniendo en cuenta los crecientes niveles de urbanización, el uso del hormigón es y será cada vez mayor en los próximos años. Considerando que los áridos constituyen alrededor del 70% del volumen del

hormigón, se prevén tasas alarmantes de agotamiento de recursos naturales no renovables como la arena de río y la piedra caliza [43].

En general, este artículo presenta una visión general del estado del arte en cuanto al uso de plástico como sustituto de los áridos gruesos y/o finos en las mezclas de hormigón. Además, se incluyen las ventajas y desventajas del uso de agregados plásticos. Este artículo comienza explicando la mayor amenaza que el plástico representa para el medio ambiente, luego, se presentan también las propiedades mecánicas de este nuevo tipo de hormigón. En cuanto a las discusiones y resultados, se tratará de los resultados de la investigación de laboratorio que estudia el rendimiento de los áridos plásticos en la mezcla de hormigón. El objetivo principal de este artículo es revisar los estudios relacionados con los áridos plásticos en la mezcla de hormigón.

## RESULTADOS

Esta revisión sistemática analizó, en total, 20 artículos científicos relacionados con el uso de agregados plásticos en la mezcla de hormigón. Los artículos se clasificaron en 8 categorías según el tipo de árido que contenía la mezcla de hormigón. La siguiente tabla ilustra las categorías, una descripción de estas y los títulos de los artículos de cada categoría.

| Categoría                                       | Descripción   | No. | Título   | Autor                  | Año  |
|---|---|-----|--|------------------------|------|
| Plástico de tereftalato de polietileno (PET)    | El PET es uno de los tipos de residuos plásticos más comunes. Suele utilizarse en un porcentaje de sustitución no superior al 50%. Se ha demostrado que aumenta la trabajabilidad y la resistencia a la tracción. | 1   | Influence of Reduced Water Cement Ratio on Behaviour of Concrete Having Plastic Aggregate  | Saad Tayyab et al.     | 2018 |
|   |   | 2   | Investigation of the effectiveness of CFRP strengthening of concrete made with recycled waste PET fine plastic aggregate                 | Shaker Qaidi et al.    | 2022 |
|   |   | 3   | Study of Waste Plastic Mix Concrete with Plasticizer   | Baboo Rai et al.       | 2012 |
|   |   | 4   | Effects of waste PET as coarse aggregate on the fresh and harden properties of concrete  | Islam et al.           | 2016 |
|   |   | 5   | Fresh, Mechanical and Absorption Characteristics of Self-Consolidating Concretes Including Low Volume Waste PET Granules                 | Kasım Mermerdaş et al. | 2017 |
|   |   | 6   | Employment the plastic waste to produce the lightweight concrete   | Hameeda and Ahmed      | 2018 |
|   |   | 7   | ECO-FRIENDLY CONCRETE CONTAINING PET PLASTIC WASTE AGGREGATE   | Khalil y Khalaf        | 2017 |
| Plástico acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) | Este tipo de plástico mejora la trabajabilidad, la resistencia a la abrasión y disminuye el coeficiente de sortividad.  | 8   | Performance Evaluation of Plastic Concrete Modified with E-Waste Plastic as a Partial Replacement of Coarse Aggregate                    | Farhan Ahmad           | 2021 |
| Plástico de polipropileno (PP)                  | El plástico PP puede aumentar las propiedades mecánicas, como la resistencia a la compresión y a la tracción. Además, disminuye la densidad.  | 9   | Comparative Study of Concrete with Polypropylene and Polyethylene Terephthalate Waste Plastic as Partial Replacement of Coarse Aggregate | Md. Jahidul Islam      | 2022 |

|  |   |    |  |                              |      |
|--|---|----|--|------------------------------|------|
|  |   | 10 | Compressive Strength and Bulk Density of Concrete Hollow Blocks (CHB) with Polypropylene (PP) Pellets as Partial Replacement for Sand            | Lasco et al.                 | 2017 |
|  |   | 11 | Investigating the Behavior of the Plastic Concrete Made with Different Types of Fibers with an Approach to the Mixing Plans of Plastic Concrete  | Ostovarzijerdi et al.        | 2019 |
| Plástico de polietileno (PE)                       | El plástico PE aumentó la resistencia a la tracción; sin embargo, disminuyó la resistencia a la compresión.   | 12 | Use of plastic in concrete to improve its properties   | Raghatate Atul               | 2012 |
|  |   | 13 | AN EXPLORATORY COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE CONTAINING MODIFIED ARTIFICIAL POLYETHYLENE AGGREGATE (MAPEA)                                    | Hadipramana et al.           | 2016 |
| Plástico de polietileno de alta densidad (HDPE)    | El plástico HDPE ha provocado un aumento de la porosidad en la mezcla de hormigón, así como una disminución de la resistencia a la compresión. Sin embargo, este plástico puede utilizarse en algunas mezclas de hormigón estructural y ligero.                             | 14 | Evaluation of Pervious Concrete Utilizing Recycled HDPE as Partial Replacement of Coarse Aggregate with Acrylic as Additive                      | Lopez et al.                 | 2019 |
|  |   | 15 | Mechanical and physical properties and morphology of concrete containing plastic waste as aggregate  | Belmokaddem et al.           | 2020 |
|  |   | 16 | Experimental study on use of HDPE plastic aggregate in concrete  | Rosemy Suvitha and Hariharan | 2020 |
| Plástico de polietileno de baja densidad (LDPE)    | El plástico LDPE ha disminuido no significativamente la resistencia a la compresión así como a la tracción.   | 17 | Effect of Waste Low Density Polyethylene on Mechanical Properties of Concret   | Chaudhary et al.             | 2014 |
| Polietileno de baja densidad (LDPE) y plástico PET | En combinación con el plástico PET, el LDPE muestra un aumento de la resistencia a la compresión y a la tensión en comparación con el hormigón simple.  | 18 | EXPERIMENTAL STUDY ON MECHANICAL BEHAVIOUR OF CONCRETE BEAMS WITH SHREDDED PLASTICS  | De Jesus et al.              | 2018 |
| Cloruro de polivinilo (PVC)                        | El plástico PVC puede utilizarse en las mezclas de hormigón mientras el porcentaje de sustitución no sea superior al 30%. Las características de durabilidad mejoran y la pérdida de resistencia a la compresión no es significativa en comparación con el hormigón simple. | 19 | Engineering properties and environmental impact assessment of green concrete prepared with PVC waste powder: A step towards sustainable approach | M.Manjunatha et al           | 2022 |
|  |   | 20 | Comparative study of effect on compressive strength by partial replacement of PVC waste with natural coarse aggregate in concrete                | Khan and Ahmad               | 2020 |

Tabla 2: Categorías para análisis de resultados.

## **1. Plástico de tereftalato de polietileno (PET)**

Esta categoría se refiere a los 7 primeros artículos que aparecen en la Figura 1. Estos artículos informan sobre el efecto del árido plástico de PET en las propiedades (como la resistencia a la compresión, a la tracción, a la flexión, la densidad o la trabajabilidad) de diferentes mezclas de hormigón como el hormigón auto-consolidante, el hormigón con aditivos (como el plastificante y el superplastificante) y el hormigón ligero.

Los artículos 1 y 3 informan sobre la resistencia a la compresión y la trabajabilidad del hormigón con agregados plásticos de PET que contiene superplastificante. El aditivo utilizado aumentó la resistencia a la compresión. El artículo 1 informa de un aumento del 19,25% para un porcentaje de adición de plástico PET del 40% y una relación agua-cemento baja de 0,3 [50]. El artículo 3 indica que la resistencia a la compresión aumenta aproximadamente un 5% tras la adición de superplastificante a la mezcla [51]. El artículo 1 informa de una disminución de la trabajabilidad [50] y el artículo 3 informa de que la trabajabilidad de la mezcla de hormigón con PET aumenta entre un 10 y un 15% cuando se añade superplastificante al hormigón de mezcla de residuos plásticos; sin embargo, la trabajabilidad puede considerarse media [51].

El artículo 2 habla del efecto sobre la resistencia a la compresión de una probeta de hormigón con agregado plástico de PET confinado con fibras de polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP). Los resultados indican que el confinamiento con CFRP con una tasa de sustitución del 25%, la resistencia se mejora (se recupera) en un 58,9%

(89,82%) (para p/c de 0,40) y en un 66,4% (98,26%) (para p/c de 0,45). Todas las muestras confinadas con tejidos CFRP para todas las mezclas mostraron una mejora significativa de la resistencia en comparación con las muestras no confinadas para las mismas proporciones de sustitución. La proporción de mejora osciló entre el 8% y el 190% [52].

El artículo 5 evalúa la capacidad de absorción y las características mecánicas del hormigón auto-consolidante (HAC) utilizando un volumen bajo de agregados de PET. La cantidad de PET incrementada en los valores de absorción de agua del HAC aumentó del 2,3% al 3,3% desde el PET0 (ratio de sustitución del 0% en volumen de cemento) hasta el PET8 (ratio de sustitución del 8% en volumen de cemento), respectivamente [53]. La resistencia a la compresión del PET1 fue de 83,4 MPa mientras que el PET8 tuvo 68,8 MPa. Se comprobó que la inclusión de partículas de PET hasta el 5% daba lugar a una mejora indistinta de la capacidad de resistencia a la tracción por división. El hormigón PET5 satisficó todos los requisitos del HAC con un rendimiento razonable en las propiedades de endurecimiento. Los resultados obtenidos para este hormigón son 5,4 MPa, 72,0 MPa y 3,1% para la resistencia a la tracción, la resistencia a la compresión y la absorción de agua, respectivamente [53].

El artículo 6 muestran que la compresión disminuye a medida que aumenta el contenido de PET. Sin embargo, la proporción del 1% de PET da el valor óptimo al alcanzar una resistencia a la compresión de 21 MPa. Por otra parte, se encontró un aumento en la resistencia a la tracción por división, especialmente en el 1% de PET y el 7% de PET con ratios de incremento del 130%, 102% respectivamente en

comparación con la mezcla de hormigón de mortero cemento. El modo de fallo de las muestras de PET resultó ser semidúctil en comparación con las muestras de hormigón convencional, que presentan una naturaleza de fractura frágil [54].

Los artículos 4 y 7 señalan que la trabajabilidad del hormigón con agregados de PET (PAC) aumenta con el porcentaje de agregados gruesos de PET (PCA), así como con el aumento de la relación agua-cemento. Además, la forma redonda del PCA proporciona menos vacíos en comparación con el resto, lo que conduce a una mejor trabajabilidad [55]. En cuanto a la densidad, según el artículo 4, los datos de las pruebas indican una reducción gradual de la densidad del CAP en comparación con el hormigón de áridos naturales (NAC) y la variación oscila entre el 4% y el 10%. A medida que aumenta la relación agua-cemento, la densidad del CAP disminuye [55]. Asimismo, el artículo 7 también indica que hay una reducción de la densidad en seco a medida que aumenta el agregado PET. El artículo 7 expresa que el aumento porcentual de la energía a la flexión de las probetas de hormigón con 10%, 20% y 30%, 40% y 50% de agregado de residuos plásticos de PET es de 251,7%, 272,4%, 337,9%, 362,1% y 413,7% respectivamente en comparación con los especímenes de referencia [56].

Artículos 4 y 7 indican que el NAC mostró un aumento significativo de la resistencia a la compresión en comparación con el PAC. Sin embargo, en el artículo 4, para una mezcla de hormigón con una relación w/c de 0,42 la pérdida de resistencia a la compresión es insignificante, especialmente para el CAP con un 20% de PCA, se alcanzó una resistencia a la compresión de 30,3 MPa [55]. El artículo 7 señala que el hormigón con un 40% de áridos de residuos plásticos de PET puede clasificarse como

hormigón ligero estructural, mientras que el hormigón con un 50% de áridos de residuos plásticos de PET es un hormigón ligero no estructural según la norma ACI 213R [56]. El artículo 4 indica que la inclusión de partículas de PET hasta el 5% dio lugar a una mejora indistinta de la capacidad de resistencia a la tracción por división. Sin embargo, por encima de este valor también se observó una ligera disminución [53].

## **2. Plástico acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)**

Esta categoría incluye sólo el artículo 8. Los resultados indican que la resistencia a la compresión, la resistencia a la tracción por división y la resistencia a la flexión del hormigón de áridos plásticos reciclados (RPAC) disminuyeron en un rango de 9,9-52,7%, 7,8-47,5% y 11-39,4%, respectivamente, para ratios de sustitución del 10-50%. Sin embargo, los resultados también indican que la incorporación del árido grueso plástico (10-50%) mejoró la trabajabilidad del hormigón. También mejoró la resistencia a la abrasión: aumentó en un 32,3%, 38,9%, 42,3%, 46,1% y 51,6% con una sustitución del 10%, 20%, 30%, 40% y 50% de árido grueso natural (ACN), respectivamente. Se observó una disminución significativa del coeficiente de sorptividad con una cantidad creciente de agregado grueso plástico. Con referencia a la mezcla de control, la reducción porcentual de los valores del coeficiente de sorptividad del RPAC que contenía un 10%, 20%, 30%, 40% y 50% de ACP fue del 11,81%, 18,89%, 29,92%, 36,2% y 41,7%, respectivamente.

## **3. Plástico de polipropileno (PP)**

Entre los artículos centrados en el plástico PP se encuentran los artículos 9, 10, 11 y 12. Al igual que las categorías anteriores, también se analizan las propiedades mecánicas del

hormigón con agregados plásticos. El artículo 9 compara la densidad y la resistencia a la compresión proporcionadas por el hormigón con agregados de PET (PTC) y el hormigón con agregados de PP (PPC) en una mezcla de hormigón. Se descubrió que el PPC, en una proporción de sustitución del 10% y una relación agua-cemento de 0,48, ha mostrado una resistencia a la compresión hasta un 39% superior a la del hormigón con áridos de ladrillo (BAC). Por otro lado, el hormigón con PTC ha mostrado hasta un 53% de reducción en la resistencia a la compresión en comparación con el BAC [57]. En cuanto a la densidad, tanto el PPA como el PTA tienen un peso específico y un peso unitario menores que el BA, por lo que, en ambos casos, la densidad del hormigón se reduce al aumentar el contenido de áridos plásticos en la mezcla de hormigón y al aumentar la relación w/c. Sin embargo, el PP tiene una densidad menor que el árido de PET [57].

El artículo 11 compara el rendimiento de las fibras de polipropileno, metal enganchado y metal corrugado en la mezcla de hormigón. La adición de todas las fibras casi redujo la resistencia a la compresión del hormigón a diferentes edades y esta disminución de la resistencia a la compresión se observó con el aumento del contenido de fibra en las muestras hechas con fibras de PP [58]. La adición de la fibra aumentó la resistencia a la tracción de todas las muestras de hormigón, que, en promedio, las resistencias a la tracción de las muestras hechas con fibras tuvieron un crecimiento de la resistencia de más del 50% más que las muestras de hormigón sin fibras. El artículo 10 se centra en la resistencia a la compresión y la densidad aparente del hormigón con agregados de PP utilizado en la elaboración de bloques huecos de hormigón (CHB). La densidad aparente disminuye a medida que aumenta el porcentaje de sustitución del agregado de polipropileno (PP). La resistencia a la compresión también disminuye a medida que aumenta el agregado del PP: sin embargo, se observó que la resistencia a la compresión

de los especímenes del lote con un 10% de reemplazo de PP fue mayor en comparación con los lotes con 0% de reemplazo de PP [59].

#### **4. Plástico de polietileno (PE)**

En esta categoría se incluyen los artículos 12 y 13. Ambos artículos evalúan la resistencia a la compresión de las mezclas de hormigón que utilizan áridos plásticos de PE; sin embargo, en el artículo 13, los áridos que se estudian son el árido de polietileno artificial (APEA) y el árido de polietileno artificial modificado (MAPEA).

Ambos artículos indican que la resistencia a la compresión disminuye a medida que aumenta el porcentaje de sustitución del PE. El artículo 12 indica que, a medida que aumenta el porcentaje de plástico, la adición de un 1% de plástico en el hormigón provoca una reducción de la resistencia de aproximadamente un 20% tras 28 días de curado [60]. Asimismo, los resultados del artículo 13 mostraron que, a los 14 días de curado, la resistencia a la compresión del hormigón MAPEA era superior a la del hormigón APEA. Para las mezclas que utilizan MAPEA, la resistencia a la compresión al 0%, 3%, 6%, 9% y 12% de sustitución es de 33,9 MPa, 30,1 MPa, 28,5 MPa, 27,2 MPa y 23,4 MPa, respectivamente. Para las mezclas que utilizan APEA, la resistencia a la compresión al 0%, 3%, 6%, 9% y 12% de sustitución es de 33,9 MPa, 23,7 MPa, 27,4 MPa, 26,6 MPa y 21,8 MPa, respectivamente. Sin embargo, a los 28 días de curado, los hormigones MAPEA y APEA alcanzaron casi la misma resistencia a la compresión. Se informó que la mezcla con 3% de APEA y MAPEA, a los 28 días de curado, tienen la mayor resistencia a la compresión, que fue de 34,2 MPa y 32,7 MPa, respectivamente. La menor resistencia a la compresión correspondió a las mezclas con un 12% de MAPEA (23 MPa) y APEA (25 MPa). Esto indica que el porcentaje de agregados artificiales, como APEA y

MAPEA, no debe superar el 3% [61]. El artículo 12 también evaluó la resistencia a la tracción y observó una mejora a medida que aumentaba el contenido de áridos de PE; hasta un 0,8% de mejora de la resistencia [61].

## **5. Plástico de polietileno de alta densidad (HDPE)**

Esta categoría se refiere a los artículos 14, 15 y 16. Estos artículos utilizan agregados de plástico HDPE y estudian propiedades como la permeabilidad, las características de aislamiento acústico y la porosidad. El artículo 14 se centra en el rendimiento del hormigón permeable con polímeros acrílicos (AcPPcC) y del hormigón permeable con un 15% de aditivo acrílico (PCHA). El hormigón permeable se refiere al hormigón con un alto contenido de huecos para permitir la permeabilidad del agua o del aire [62]. En este caso, hay una adición de aditivo o polímero acrílicos. Se evaluaron dos tamaños de agregados de HDPE:  $\frac{1}{2}$ " y  $\frac{3}{4}$ ". Los resultados indican que la mezcla controlada (CM), que es el cemento Portland tradicional, obtuvo la menor permeabilidad y porosidad. Mientras que, fue el Hormigón Permeable de  $\frac{1}{2}$ " 30% HDPE modificado con 15% de aditivo acrílico (PCHA) el que obtuvo la mayor permeabilidad y porosidad con un valor de 6,4281 cm/s y 37,26%, respectivamente.

La resistencia global a la compresión disminuye a medida que aumenta el porcentaje de sustitución de los áridos HDPE. El espécimen de AcPPC obtuvo la resistencia óptima con un valor medio de 11,590 MPa. El espécimen que obtuvo el segundo valor más alto fue el de  $\frac{1}{2}$ "-sized 10% PCHA con un valor medio de 4.147 MPa seguido por el de  $\frac{3}{4}$ "-sized 10% PCHA con un valor medio de 3.183 MPa. Mientras que el PCHA de  $\frac{1}{2}$ " tamaño 30% tiene el valor más bajo de resistencia a la compresión con un valor medio de 1,445 MPa [48].

El artículo 15 se centra en el rendimiento de altos volúmenes de agregados plásticos de HDPE en mezclas de hormigón. Los valores de la velocidad de impulso ultrasónico (UPV) del hormigón disminuyen con el aumento de la cantidad de contenido de agregado plástico. El valor más bajo de UPV se midió en el hormigón con un 75% de HDPE, lo que indujo mejores características de aislamiento acústico. Además, las mezclas con altos niveles de sustitución de HDPE la resistencia a la compresión del hormigón era un 88% menor que la del hormigón normal (RC) [63].

El artículo 16 se centra en el rendimiento de un alto porcentaje de sustitución de agregados plásticos de HDPE. Los resultados indican que una viga con un 10% de sustitución de áridos gruesos por áridos plásticos de HDPE muestra un rendimiento no muy diferente en comparación con la viga convencional. Por ejemplo, la viga de plástico con un 10% de HDPE tiene una resistencia a la compresión de 22,33 N/mm<sup>2</sup> mientras que la viga convencional tiene 32 MPa. Se informó de que la viga convencional y la viga de plástico alcanzaron una resistencia de 11,5 MPa y 12,02 MPa, respectivamente. Sin embargo, la viga de plástico con un 30% de sustitución muestra un mal comportamiento en comparación con la viga convencional. La relación agua-cemento utilizada es de 0,45 [64].

## **6. Plástico de polietileno de baja densidad (LDPE)**

Esta categoría sólo incluye el artículo 17. El artículo expone el efecto del agregado de plástico LDPE en la resistencia a la tracción y a la compresión de una mezcla de hormigón. Los resultados revelan que la reducción media de la resistencia a la compresión

del hormigón plástico es del 1%, como se muestra en la figura 26. La reducción media de la resistencia a la tracción por división del hormigón plástico es también del 1%. Con un 0% de mezcla de PEBD, la resistencia a la tracción es de 1,83 MPa, con un 0,4% de resistencia a la tracción es de 1,72 MPa, con un 0,6% de resistencia a la tracción es de 1,76 MPa y con un 0,8% de resistencia a la tracción dividida es de 1,77 MPa en 7 días.

### **7. Polietileno de baja densidad (LDPE) y plástico PET**

Esta categoría incluye sólo el artículo 18. El artículo analiza la resistencia a la compresión, a la tracción y a la flexión de mezclas de hormigón que utilizan un porcentaje bajo (0,5%) de sustitución de agregados de plástico PET y LDPE. Las resistencias medias a la compresión, flexión y tracción del hormigón plástico fueron de 22,24 MPa, 6,39 MPa y 4,25 MPa, respectivamente. Para el hormigón normal, fue de 21,82 MPa, 5,56 MPa y 3,95 MPa, respectivamente. La comparación entre la capacidad de momento de rotura del hormigón normal -que fue del 2,22%- y la viga de hormigón con plástico -que fue del 2,39%- mostró un aumento de la capacidad para las vigas con plástico. La prueba estadística demostró que este aumento es significativo [66].

### **8. Plástico de cloruro de polivinilo (PVC)**

Esta categoría comprende los artículos 19 y 20. En el caso del artículo 19, evalúa el desempeño del agregado de PVC triturado (PVCW) combinado con agregado de escoria de alto horno granulada molida (GGBF) en una mezcla de concreto. Por otro lado, el artículo 20 estudia áridos plásticos de PVC triturado y agregados de láminas de PVC desechadas (PVCS) y los agregados de tuberías de PVC desechadas (PVCP).

El artículo 19 exhibe que hubo un incremento en la trabajabilidad del concreto para las mezclas PWP0 (valor de asentamiento de 105 milímetros) y PWP5 (valor de asentamiento de 115 milímetros). También se encontró que a medida que aumenta el porcentaje de PWP, se nota una mejora en la resistencia a la compresión (CS) del concreto hasta la mezcla PWP10 en comparación con la mezcla de concreto convencional (CCM) tanto a los 28 como a los 90 días de curado. A los 90 días de curado, CCM tiene una CS de 51,20 MPa mientras que PW10 tiene 57,01 MPa. Después de que se observe una disminución insignificante en la fuerza para las mezclas preparadas más allá de una dosis del 10 % de PWP junto con un 30 % de GGBS. También se observa que las mezclas preparadas con PWP hasta en un 15 % exhiben mejor CS en comparación con CCM. Las mezclas PWP20, PWP25, PWP30 exhiben una disminución marginal en la resistencia en comparación con CCM [67]. La resistencia a la tracción para PWP10, PWP15, PWP20 y PWP 25 fue de 7,11 MPa, 7,05 MPa, 6,87 MPa y 6,63 MPa, respectivamente a los 90 días de curado. También se observa que la mezcla PWP30 logró una resistencia mínima a la tracción (que fue de 6,22 MPa) en comparación con todas las mezclas y la mezcla CCM, el reemplazo parcial de PWP por cemento aumenta junto con los contenidos fijos de GGBS, se nota una disminución marginal en la resistencia más allá de PWP5 mezcla. La sustitución parcial del cemento por PWP aumenta con la dosis constante de GGBS, la resistencia a la flexión también aumenta hasta una dosis del 5% (PWP5) de PWP (5,52 MPa) en comparación con la mezcla de control (4,92 MPa). Posteriormente se nota una reducción marginal en la resistencia para las mezclas PWP10 (5,30 MPa), PWP15 (5,25 MPa), PWP20 (4,99 MPa) y PWP 25 (4,86 MPa), excepto la mezcla PWP30 [67].

Los resultados obtenidos del artículo 20 indican que a medida que aumenta el contenido de agregado de PVC, la resistencia a la compresión disminuye. La resistencia a la compresión para un reemplazo de sustitución del 5%, 15% y 25% es de 1991,26 Psi, 1706,80 Psi y 1493 Psi, respectivamente. La mayor resistencia a la compresión se logra cuando el porcentaje de sustitución es del 5%.

## CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo fue logrado tras llevar a cabo una extensa recopilación de artículos referentes a la evaluación de las propiedades y comportamiento del concreto que contiene agregados plásticos (PA). Los estudios indican que la resistencia a la compresión disminuyó a medida que aumentó el contenido de PA, esto se debe principalmente a una zona transición interfacial débil debido a la superficie lisa del agregado plástico que produce una adhesividad débil entre la pasta de cemento y el PA. En cuanto a la resistencia a la flexión, esta parece ser aumentada cuando se incluye PP, PET con LDPE, o especialmente agregado de PET. Esta mejora en la resistencia a flexión puede estar relacionada a la capacidad de los agregados de desechos plásticos para prolongar el intervalo de propagación de grietas debido a sus características no frágiles. Los agregados plásticos ABS, HDPE, PE o PVC no tuvieron un efecto positivo en la resistencia a la flexión lo cual también puede ser atribuido a una débil zona de transición interfacial.

Bajos volúmenes de PET, PE, PVC, PET combinados con agregados plásticos LDPE o PP mostraron el efecto más beneficioso sobre la resistencia a la tracción, mientras que los agregados plásticos ABS o PP fueron perjudiciales. La trabajabilidad, por otro lado, no fue afectada por PA sino por la relación agua-cemento de la mezcla. Las propiedades de durabilidad como la densidad se reducen cuando el contenido de PA aumenta debido a la baja densidad del plástico en comparación con la de los agregados convencionales. Sin embargo, la reducción de la densidad puede estar asociada a una alta tenacidad y resistencia a la abrasión. En cuanto a las otras propiedades como la permeabilidad y la porosidad, se puede afirmar que la adición de agregados de HDPE en la mezcla de concreto permeable aumenta la permeabilidad y la porosidad de este tipo de concreto. El

mayor porcentaje de reemplazo da como resultado un mayor valor de porosidad y permeabilidad. Además, los agregados de HDPE se pueden usar como reemplazo de los agregados sin comprometer la porosidad y la permeabilidad de un hormigón permeable típico, ya sea empleando áridos de tamaño de  $\frac{1}{2}$ " o  $\frac{3}{4}$  [48].

Son muchas las medidas que se pueden tomar para compensar la pérdida de resistencia como la reducción de la relación agua-cemento, el tratamiento químico con  $\text{Ca}(\text{ClO})_2$  para mejorar la adhesión entre la pasta de cemento y la superficie del árido plástico, la adición de superplastificantes o el uso del confinamiento de especímenes con fibras de polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP). Los artículos analizados plantean la posibilidad de una amplia gama de usos para el hormigón con áridos plásticos. Puede ser utilizado en la elaboración de concreto liviano, de baja trabajabilidad, semi dúctil, estructural o no estructural. Las posibles aplicaciones futuras incluyen aceras, paneles de tabiques, revestimiento de canales, vigas, bloques huecos, mezcla de concreto permeable, etc. Incluso un pequeño porcentaje de sustitución, como, por ejemplo, un 0.5% de sustitución, de agregados naturales por PA representa cientos de toneladas de plástico siendo recicladas y representan una solución alternativa a la problemática del manejo y descarte adecuado de plástico que enfrenta la sociedad actualmente. La inclusión de desechos plásticos en la mezcla de concreto parece ser el siguiente paso factible y beneficioso para la industria de la construcción.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. S. Yang *et al.*, “Progresses in Polystyrene Biodegradation and Prospects for Solutions to Plastic Waste Pollution,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 150, p. 012005, May 2018, doi: 10.1088/1755-1315/150/1/012005.
- [2] “U.S. Plastic Recycling Rates Are Even Worse Than We Thought | Time.” <https://time.com/6178386/plastic-recycling-rates-overestimated/> (accessed Sep. 23, 2022).
- [3] R. Verma, K. S. Vinoda, M. Papireddy, and A. N. S. Gowda, “Toxic Pollutants from Plastic Waste- A Review,” *Procedia Environ. Sci.*, vol. 35, pp. 701–708, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.proenv.2016.07.069.
- [4] R. R. N. S. Bhattacharya, K. Chandrasekhar, P. Roy, and A. Khan, “Challenges and opportunities: plastic waste management in India,” Jun. 2018, Accessed: Sep. 23, 2022. [Online]. Available: <http://archive.nyu.edu/handle/2451/42242>
- [5] “Ecuador es el tercer país de la región que más basura plástica importa,” *Primicias*. <https://www.primicias.ec/noticias/sociedad/desechos-residuos-plasticos-basura-ecuador/> (accessed Nov. 29, 2022).
- [6] H. L. Chen, T. K. Nath, S. Chong, V. Foo, C. Gibbins, and A. M. Lechner, “The plastic waste problem in Malaysia: management, recycling and disposal of local and global plastic waste,” *SN Appl. Sci.*, vol. 3, no. 4, p. 437, Mar. 2021, doi: 10.1007/s42452-021-04234-y.
- [7] W. K. Viscusi, J. Huber, and J. Bell, “Alternative Policies to Increase Recycling of Plastic Water Bottles in the United States,” *Rev. Environ. Econ. Policy*, Jul. 2012, doi: 10.1093/reep/res006.
- [8] J. Turk, Z. Cotič, A. Mladenovič, and A. Šajna, “Environmental evaluation of green concretes versus conventional concrete by means of LCA,” *Waste Manag.*, vol. 45, pp. 194–205, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.wasman.2015.06.035.
- [9] B. Estanqueiro, J. Dinis Silvestre, J. de Brito, and M. Duarte Pinheiro, “Environmental life cycle assessment of coarse natural and recycled aggregates for concrete,” *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, vol. 22, no. 4, pp. 429–449, Apr. 2018, doi: 10.1080/19648189.2016.1197161.
- [10] C. Opportunities *et al.*, “World Construction Aggregates,” *The Freedonia Group*. <https://www.freedoniagroup.com/industry-study/world-construction-aggregates-2838.htm> (accessed Nov. 16, 2022).
- [11] Md. J. Islam and Md. Shahjalal, “Effect of polypropylene plastic on concrete properties as a partial replacement of stone and brick aggregate,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 15, p. e00627, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00627.
- [12] “The Age of Plastic: From Parkesine to pollution,” *Science Museum*. <https://www.sciencemuseum.org.uk/objects-and-stories/chemistry/age-plastic-parkesine-pollution> (accessed Oct. 01, 2022).
- [13] B. P. Federation, “How Is Plastic Made? A Simple Step-By-Step Explanation,” *British Plastics Federation*. <https://www.bpf.co.uk/plastipedia/how-is-plastic-made.aspx> (accessed Oct. 01, 2022).
- [14] “Types of Plastic Food Packaging and Safety: A Close-Up Look,” *ChemicalSafetyFacts.org*. <https://www.chemicalsafetyfacts.org/types-plastic-food-packaging-safety-close-look/> (accessed Oct. 01, 2022).

- [15] “Polypropylene Plastic Uses (PP) | Plastic Properties & Applications.” <https://adrecoplastics.co.uk/polypropylene-uses/> (accessed Oct. 01, 2022).
- [16] T. Rogers, “Everything You Need To Know About Polyethylene (PE).” <https://www.creativemechanisms.com/blog/polyethylene-pe-for-prototypes-3d-printing-and-cnc> (accessed Oct. 01, 2022).
- [17] wkmounts, “LDPE vs. HDPE: Similarities and Differences,” *OMICCO Plastics, Inc.*, Jan. 16, 2020. <https://omicoplastics.com/blog/ldpe-hdpe-similarities-and-differences/> (accessed Oct. 30, 2022).
- [18] “Polyvinyl Chloride PVC.” <https://www.bpf.co.uk/plastipedia/polymers/PVC.aspx> (accessed Oct. 01, 2022).
- [19] B. T. A. Manjunath, “Partial Replacement of E-plastic Waste as Coarse-Aggregate in Concrete,” *Procedia Environ. Sci.*, vol. 35, pp. 731–739, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.proenv.2016.07.079.
- [20] M. Ledererová, Z. Štefunková, V. Gregorová, and D. Urbán, “The issue of plastic waste in the environment and its possible uses as a substitute for filler in lightweight concrete,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 549, no. 1, p. 012032, Jun. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/549/1/012032.
- [21] “Processing, mechanical characterization, and micrography of 3D-printed short carbon fiber reinforced polycarbonate polymer matrix composite material | SpringerLink.” <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-020-05195-z> (accessed Oct. 01, 2022).
- [22] M. Brandtner-Hafner, “Fracture Mechanical Characterization of Adhesively Bonded Wood-Ceramic Interfaces for Mode I Loading,” *J. Test. Eval.*, vol. 48, pp. 3986–3998, Sep. 2020, doi: 10.1520/JTE20180256.
- [23] S. Habib, “What is Hardness in Plastics? An In-Depth Guide,” *PlasticRanger*, May 16, 2022. <https://plasticranger.com/what-is-hardness-in-plastics/> (accessed Oct. 01, 2022).
- [24] A. Mittal, “What is Shore Hardness Scale? | The Complete Guide,” *PlasticRanger*, May 26, 2022. <https://plasticranger.com/what-is-shore-hardness-scale/> (accessed Oct. 01, 2022).
- [25] S. Habib, “What are Modulus of Elasticity Units | The Ultimate Guide,” *PlasticRanger*, May 04, 2022. <https://plasticranger.com/what-are-modulus-of-elasticity-units/> (accessed Oct. 01, 2022).
- [26] Suryakanta, “10+ GENERAL PROPERTIES OF PLASTIC AS A CONSTRUCTION MATERIAL,” *CivilBlog.Org*, Jul. 09, 2015. <https://civilblog.org/2015/07/09/10-general-properties-of-plastic-as-a-construction-material/> (accessed Oct. 01, 2022).
- [27] Z. O. G. Schyns and M. P. Shaver, “Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review,” *Macromol. Rapid Commun.*, vol. 42, no. 3, p. 2000415, 2021, doi: 10.1002/marc.202000415.
- [28] T. Thiounn and R. C. Smith, “Advances and approaches for chemical recycling of plastic waste,” *J. Polym. Sci.*, vol. 58, no. 10, pp. 1347–1364, 2020, doi: 10.1002/pol.20190261.
- [29] K. Ragaert, L. Delva, and K. Van Geem, “Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste,” *Waste Manag.*, vol. 69, pp. 24–58, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.wasman.2017.07.044.
- [30] M. G. Davidson, R. A. Furlong, and M. C. McManus, “Developments in the life cycle assessment of chemical recycling of plastic waste – A review,” *J. Clean. Prod.*, vol. 293, p. 126163, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126163.

- [31] R. Miandad *et al.*, “Catalytic Pyrolysis of Plastic Waste: Moving Toward Pyrolysis Based Biorefineries,” *Front. Energy Res.*, vol. 7, 2019, Accessed: Oct. 01, 2022. [Online]. Available: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2019.00027>
- [32] R. Volk *et al.*, “Techno-economic assessment and comparison of different plastic recycling pathways: A German case study,” *J. Ind. Ecol.*, vol. 25, no. 5, pp. 1318–1337, 2021, doi: 10.1111/jiec.13145.
- [33] M. S. Qureshi *et al.*, “Pyrolysis of plastic waste: Opportunities and challenges,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 152, p. 104804, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.jaap.2020.104804.
- [34] “The History of Concrete.” <https://www.nachi.org/history-of-concrete.htm> (accessed Oct. 01, 2022).
- [35] “Portland Cement - an overview | ScienceDirect Topics.” <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/portland-cement> (accessed Oct. 28, 2022).
- [36] CementConcrete, “Manufacturing of Portland Cement – Process and Materials,” *Cement Concrete*, Apr. 05, 2020. <https://cementconcrete.org/cement-concrete-applications/manufacturing-of-cement/2192/> (accessed Oct. 01, 2022).
- [37] “Aggregates.” <https://www.cement.org/cement-concrete/concrete-materials/aggregates> (accessed Oct. 01, 2022).
- [38] “Aggregates for Concrete.” <http://www.greenspec.co.uk/building-design/aggregates-for-concrete/> (accessed Oct. 01, 2022).
- [39] “annex\_18.pdf.” Accessed: Oct. 01, 2022. [Online]. Available: [https://www.mitma.gob.es/recursos\\_mfom/annex\\_18.pdf](https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/annex_18.pdf)
- [40] M. N. Hassoun and A. Al-Manaseer, *Structural Concrete: Theory and Design*. John Wiley & Sons, 2020.
- [41] “Design Requirements of Concrete Based on ACI 318-19,” *The Constructor*, Apr. 02, 2020. <https://theconstructor.org/concrete/design-requirements-concrete/39004/> (accessed Oct. 01, 2022).
- [42] A. M. Olowofoyeku, O. M. Ofuyatan, J. Oluwafemi, A. Ajao, and O. David, “Effect of Superplasticizer on Workability and Properties of Self-Compacting Concrete,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1378, no. 4, p. 042088, Dec. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1378/4/042088.
- [43] Master, “STRUCTURE magazine | Self-Consolidating Concrete.” <https://www.structuremag.org/?p=13528> (accessed Oct. 01, 2022).
- [44] “self-consolidating concrete Topic.” <https://www.concrete.org/topicsinconcrete/topicdetail/self-consolidating%20concrete?search=self-consolidating%20concrete> (accessed Oct. 01, 2022).
- [45] “Concrete Pavement.” <https://www.cement.org/cement-concrete/products/concrete-pavement> (accessed Oct. 01, 2022).
- [46] F. Ahmad, A. Jamal, K. M. Mazher, W. Umer, and M. Iqbal, “Performance Evaluation of Plastic Concrete Modified with E-Waste Plastic as a Partial Replacement of Coarse Aggregate,” *Materials*, vol. 15, no. 1, Art. no. 1, Jan. 2022, doi: 10.3390/ma15010175.
- [47] B. Mahajan, “Tensile Strength Of Concrete Test | Split Cylinder Test Of Concrete | Tensile Strength Test Procedure,” Dec. 20, 2019. <https://civiconcepts.com/blog/tensile-strength-of-concrete> (accessed Nov. 02, 2022).
- [48] N. Lopez, E. Collado, L. A. Diacos, and H. D. Morente, “Evaluation of Pervious Concrete Utilizing Recycled HDPE as Partial Replacement of Coarse Aggregate

- with Acrylic as Additive,” *MATEC Web Conf.*, vol. 258, p. 01018, 2019, doi: 10.1051/mateconf/201925801018.
- [49] M. Kayondo, R. Combrinck, and W. P. Boshoff, “State-of-the-art review on plastic cracking of concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 225, pp. 886–899, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.197.
- [50] S. Tayyab, A. Ullah, K. Shah, F. Mehmood, and A. Gul, “Influence of Reduced Water Cement Ratio on Behaviour of Concrete Having Plastic Aggregate,” *Civ. Eng. J.*, vol. 4, no. 12, Art. no. 12, Dec. 2018.
- [51] “Study of Waste Plastic Mix Concrete with Plasticizer.” <https://www.hindawi.com/journals/isrn/2012/469272/> (accessed Nov. 01, 2022).
- [52] S. Qaidi *et al.*, “Investigation of the effectiveness of CFRP strengthening of concrete made with recycled waste PET fine plastic aggregate,” *PLOS ONE*, vol. 17, no. 7, p. e0269664, Jul. 2022, doi: 10.1371/journal.pone.0269664.
- [53] K. Mermerdaş, D. E. Nassani, and M. Sakin, “Fresh, Mechanical and Absorption Characteristics of Self-Consolidating Concretes Including Low Volume Waste PET Granules,” *Civ. Eng. J.*, vol. 3, p. 809, Nov. 2017, doi: 10.28991/cej-030916.
- [54] “Elsevier Enhanced Reader.” <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1876610218311299?token=F0103383669706D26B3842F61011D079C5073F594B76B08A57BFD3BF004B3EE7F722BD06CCE3013A135EA1F2BA17D590&originRegion=us-east-1&originCreation=20221102003315> (accessed Nov. 01, 2022).
- [55] “Effects of waste PET as coarse aggregate on the fresh and harden properties of concrete - ScienceDirect.” <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061816313915?via%3Dihub> (accessed Nov. 01, 2022).
- [56] Building and Construction Engineering Department, University of Technology / Baghdad, W. I. Khalil, K. J. Khalaf, and Building and Construction Engineering Department, University of Technology / Baghdad, “Eco-Friendly Concrete Containing PET Plastic Waste Aggregate,” *Diyala J. Eng. Sci.*, vol. 10, no. 6, pp. 92–105, Mar. 2017, doi: 10.24237/djes.2017.10109.
- [57] “Comparative Study of Concrete with Polypropylene and Polyethylene Terephthalate Waste Plastic as Partial Replacement of Coarse Aggregate.” <https://www.hindawi.com/journals/ace/2022/4928065/> (accessed Nov. 01, 2022).
- [58] “(PDF) Investigating the Behavior of the Plastic Concrete Made with Different Types of Fibers with an Approach to the Mixing Plans of Plastic Concrete.” [https://www.researchgate.net/publication/330907095\\_Investigating\\_the\\_Behavior\\_of\\_the\\_Plastic\\_Concrete\\_Made\\_with\\_Different\\_Types\\_of\\_Fibers\\_with\\_an\\_Approach\\_to\\_the\\_Mixing\\_Plans\\_of\\_Plastic\\_Concrete](https://www.researchgate.net/publication/330907095_Investigating_the_Behavior_of_the_Plastic_Concrete_Made_with_Different_Types_of_Fibers_with_an_Approach_to_the_Mixing_Plans_of_Plastic_Concrete) (accessed Nov. 01, 2022).
- [59] J. D. Lasco, M. Madlangbayan, and M. B. Sundo, “Compressive Strength and Bulk Density of Concrete Hollow Blocks (CHB) with Polypropylene (PP) Pellets as Partial Replacement for Sand,” *Civ. Eng. J.*, vol. 3, no. 10, Art. no. 10, Nov. 2017.
- [60] A. Elziny, “USE OF PLASTIC IN A CONCRETE TO IMPROVE ITS PROPERTIES”, Accessed: Nov. 02, 2022. [Online]. Available: [https://www.academia.edu/30615363/USE\\_OF\\_PLASTIC\\_IN\\_A\\_CONCRETE\\_TO\\_IMPROVE\\_ITS\\_PROPERTIES](https://www.academia.edu/30615363/USE_OF_PLASTIC_IN_A_CONCRETE_TO_IMPROVE_ITS_PROPERTIES)
- [61] J. Hadipramana, S. N. Mokhatar, A. A. A. Samad, and N. F. A. Hakim, “An Exploratory Compressive Strength Of Concrete Containing Modified Artificial Polyethylene Aggregate (MAPEA),” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 160, no. 1, p. 012065, Nov. 2016, doi: 10.1088/1757-899X/160/1/012065.

- [62] “Pervious Concrete - an overview | ScienceDirect Topics.”  
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/pervious-concrete> (accessed Nov. 02, 2022).
- [63] M. Belmokaddem, A. Mahi, Y. Senhadji, and B. Y. Pekmezci, “Mechanical and physical properties and morphology of concrete containing plastic waste as aggregate,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 257, p. 119559, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119559.
- [64] I. Journal, “Experimental study on use of HDPE plastic aggregate in concrete,” *Int. J. Intellect. Adv. Res. Eng. Comput.*, Jan. 2020, Accessed: Nov. 02, 2022. [Online]. Available: [https://www.academia.edu/44207730/Experimental\\_study\\_on\\_use\\_of\\_HDPE\\_plastic\\_aggregate\\_in\\_concrete](https://www.academia.edu/44207730/Experimental_study_on_use_of_HDPE_plastic_aggregate_in_concrete)
- [65] M. Chaudhary, V. Srivastava, and V. Agarwal, “Effect of Waste Low Density Polyethylene on Mechanical Properties of Concrete,” *J. Acad. Ind. Res. JAIR*, vol. 3, Oct. 2014.
- [66] “EXPERIMENTAL STUDY ON MECHANICAL BEHAVIOUR OF CONCRETE BEAMS WITH SHREDDED PLASTICS | GEOMATE Journal,” Nov. 2021, Accessed: Nov. 02, 2022. [Online]. Available: <https://geomatejournal.com/geomate/article/view/673>
- [67] “Engineering properties and environmental impact assessment of green concrete prepared with PVC waste powder: A step towards sustainable approach | Elsevier Enhanced Reader.”  
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2214509522005368?token=D0601462077CA23A1896AEF3A770F1C2612BA7576F5BE87E83CD2AB1AA3517F52C2A08F15E46AB08EB4FB69E8FFFBA19&originRegion=us-east-1&originCreation=20221103012621> (accessed Nov. 02, 2022).
- [68] S. Qaidi *et al.*, “Investigation of the effectiveness of CFRP strengthening of concrete made with recycled waste PET fine plastic aggregate,” *PLOS ONE*, vol. 17, no. 7, p. e0269664, Jul. 2022, doi: 10.1371/journal.pone.0269664.
- [69] A. M. Hameed and B. A. Fatah Ahmed, “Employment the plastic waste to produce the light weight concrete,” *Energy Procedia*, vol. 157, pp. 30–38, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2018.11.160.
- [70] W. Khalil and K. Khalaf, “Eco-Friendly Concrete Containing PET Plastic Waste Aggregate,” *Diyala J. Eng. Sci.*, vol. 10, Oct. 2017, doi: 10.24237/djes.2017.10109.
- [71] M. A. Guerra and S. Tripp, “Theoretically comparing design thinking to design methods for large-scale infrastructure systems,” in *DS 89: Proceedings of The Fifth International Conference on Design Creativity (ICDC 2018)*, University of Bath, Bath, UK, 2018, pp. 168–175.
- [72] “Exploring Interdisciplinary Contributions to More Sustainable Solutions in the Built Environment and Infrastructure Development Students.”  
[https://scholar.google.com/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=en&user=v24qt-gAAAAJ&sortby=pubdate&citation\\_for\\_view=v24qt-gAAAAJ:ULOm3\\_A8WrAC](https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=v24qt-gAAAAJ&sortby=pubdate&citation_for_view=v24qt-gAAAAJ:ULOm3_A8WrAC) (accessed Dec. 10, 2022).
- [73] “Work in Progress: Designing a First-Year Hands-on Civil Engineering Course to Reduce Students Dropout and Improve the Overall College Experience.”  
[https://scholar.google.com/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=en&user=v24qt-gAAAAJ&sortby=pubdate&citation\\_for\\_view=v24qt-gAAAAJ:3fE2CSJlrl8C](https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=v24qt-gAAAAJ&sortby=pubdate&citation_for_view=v24qt-gAAAAJ:3fE2CSJlrl8C) (accessed Dec. 10, 2022).
- [74] “Work in Progress: Collaborative Environments in Architecture and Civil Engineering Education—Case Study.”

[https://scholar.google.com/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=en&user=v24qt-gAAAAJ&sortby=pubdate&citation\\_for\\_view=v24qt-gAAAAJ:Zph67rFs4hoC](https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=v24qt-gAAAAJ&sortby=pubdate&citation_for_view=v24qt-gAAAAJ:Zph67rFs4hoC)  
(accessed Dec. 10, 2022).

- [75] “Validating Guerra’s Blended Flexible Learning framework for Engineering Courses.”

[https://scholar.google.com/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=en&user=v24qt-gAAAAJ&sortby=pubdate&citation\\_for\\_view=v24qt-gAAAAJ:KlAtU1dfN6UC](https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=v24qt-gAAAAJ&sortby=pubdate&citation_for_view=v24qt-gAAAAJ:KlAtU1dfN6UC)  
(accessed Dec. 10, 2022).

- [76] “Understanding Student’s Perceptions of Cultural Dimensions in construction majors: Deconstructing barriers between architecture and civil engineering students.”

[https://scholar.google.com/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=en&user=v24qt-gAAAAJ&sortby=pubdate&citation\\_for\\_view=v24qt-gAAAAJ:kNdYIx-mwKoC](https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=v24qt-gAAAAJ&sortby=pubdate&citation_for_view=v24qt-gAAAAJ:kNdYIx-mwKoC)  
(accessed Dec. 10, 2022).