



DOI: <https://doi.org/10.23857/dc.v10i2.3878>

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

Uso de Residuos Plásticos para Construcción de Escaleras en Viviendas de Interés Social

Use of Plastic Waste for Construction of Stairs in Social Interest Housing

Aproveitamento de Resíduos Plásticos na Construção de Escadas em Habitações de Interesse Social

Jorge Luis Gallegos-Rodríguez^I
luis.gallegos@unach.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0003-0212-7363>

Jean Carlos Montero-Riofrio^{II}
jcmontero_arq@outlook.com
<https://orcid.org/0009-0009-3193-5945>

Erick Fabricio Nieto-Páez^{III}
erick.nieto@unach.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0005-6708-037X>

Paúl Eduardo García-Gavidia^{IV}
eduardog0392@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0009-8568-8118>

Correspondencia: luis.gallegos@unach.edu.ec

***Recibido:** 05 de abril de 2024 ***Aceptado:** 25 de mayo de 2024 * **Publicado:** 07 de junio de 2024

- I. Máster en Arquitectura y Sostenibilidad, Arquitecto, Docente en la Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- II. Magíster en Arquitectura Mención en Proyectos Integrales, Arquitecto, Docente en la Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- III. Máster en Gestión Internacional de la Edificación y la Construcción, Arquitecto, Docente en la Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- IV. Máster en Arquitectura y Hábitat Sostenible, Arquitecto, Docente en la Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

Resumen

El uso de materiales reciclados en la construcción está ganando importancia debido a su potencial para reducir la huella ambiental y los costos. Este estudio propone un diseño modular de escalera fabricada con plástico reciclado, específicamente destinado para viviendas de interés social en Ecuador. El objetivo principal es disminuir los tiempos de construcción, la huella de carbono y los costos asociados a través de un sistema de ensamblaje modular que facilita una construcción más eficiente y liviana en el sitio de trabajo. Se compararon las escaleras modulares de plástico reciclado con las convencionales de hormigón armado, evaluando aspectos como el tiempo de montaje, la huella de carbono y el costo. Los resultados mostraron que las escaleras de plástico reciclado son significativamente más ligeras, lo que agiliza el proceso de construcción y reduce tanto el tiempo como los costos. Además, estas escaleras demostraron ser sostenibles y ecoamigables debido a su menor huella de carbono y su capacidad para soportar cargas adecuadamente. Económicamente, los costos de las escaleras de plástico reciclado se equiparan a los de hormigón, con la posibilidad de ser más rentables a gran escala debido a la producción masiva de módulos. Su flexibilidad, facilidad de transporte y montaje, junto con su adaptabilidad a diversas configuraciones, proporcionan ventajas adicionales sobre las estructuras de hormigón y extienden su vida útil, reduciendo así su impacto ambiental. Se concluye que, el sistema modular de escaleras elaboradas con PET reciclado, representa una alternativa viable y sostenible para la construcción de viviendas de interés social en Ecuador, logrando reducir el peso, acortar los tiempos de construcción, disminuir la huella de carbono y los costos.

Palabras clave: Materiales reciclados; construcción sostenible; escaleras modulares; Reciclaje de PET.

Abstract

The use of recycled materials in construction is gaining importance due to its potential to reduce environmental footprint and costs. This study proposes a modular design of a staircase made of recycled plastic, specifically intended for social housing in Ecuador. The main objective is to reduce construction times, carbon footprint and associated costs through a modular assembly system that facilitates more efficient and lighter construction on the job site. Modular stairs made of recycled plastic were compared with conventional reinforced concrete ones, evaluating aspects such as assembly time, carbon footprint and cost. The results showed that recycled plastic stairs are

significantly lighter, speeding up the construction process and reducing both time and costs. Additionally, these stairs proved to be sustainable and eco-friendly due to their lower carbon footprint and ability to adequately support loads. Economically, the costs of recycled plastic stairs are comparable to those of concrete, with the possibility of being more profitable on a large scale due to the mass production of modules. Its flexibility, ease of transport and assembly, together with its adaptability to various configurations, provide additional advantages over concrete structures and extend their useful life, thus reducing their environmental impact. It is concluded that the modular system of stairs made with recycled PET represents a viable and sustainable alternative for the construction of social housing in Ecuador, managing to reduce weight, shorten construction times, reduce the carbon footprint and costs.

Keywords: Recycled materials; sustainable construction; modular stairs; PET recycling.

Resumo

A utilização de materiais reciclados na construção está a ganhar importância devido ao seu potencial para reduzir a pegada ambiental e os custos. Este estudo propõe um projeto modular de uma escada feita de plástico reciclado, especificamente destinada à habitação social no Equador. O principal objetivo é reduzir os tempos de construção, a pegada de carbono e os custos associados através de um sistema de montagem modular que permite uma construção mais eficiente e leve no local de trabalho. Escadas modulares feitas de plástico reciclado foram comparadas com escadas convencionais de concreto armado, avaliando aspectos como tempo de montagem, pegada de carbono e custo. Os resultados mostraram que as escadas de plástico reciclado são significativamente mais leves, agilizando o processo de construção e reduzindo tempo e custos. Além disso, estas escadas provaram ser sustentáveis e ecológicas devido à sua menor pegada de carbono e à capacidade de suportar cargas adequadamente. Economicamente, os custos das escadas de plástico reciclado são comparáveis aos de concreto, com possibilidade de serem mais rentáveis em larga escala devido à produção em massa de módulos. A sua flexibilidade, facilidade de transporte e montagem, aliadas à sua adaptabilidade a diversas configurações, proporcionam vantagens adicionais relativamente às estruturas de betão e prolongam a sua vida útil, reduzindo assim o seu impacto ambiental. Conclui-se que o sistema modular de escadas feito com PET reciclado representa uma alternativa viável e sustentável para a construção de habitação social no Equador, conseguindo reduzir peso, encurtar os tempos de construção, reduzir a pegada de carbono e os custos.

Palavras-chave: Materiais reciclados; construção sustentável; escadas modulares; Reciclagem de PET.

Introducción

En el contexto actual, el papel omnipresente del plástico en la sociedad plantea desafíos significativos en términos de gestión de residuos y sostenibilidad ambiental. La producción masiva de plástico, solo superada por materiales como el acero y el cemento (Geyer et al., 2017), se debe en gran medida a su versatilidad y eficiencia en la conservación de productos (Da Rosa Oliveira, et al., 2011), así como a su bajo costo de fabricación y transporte (Mohamed et al., 2014). Sin embargo, esta abundancia tiene un costo ambiental considerable, ya que cada año se generan cientos de millones de toneladas de residuos plásticos en todo el mundo, muchos de los cuales terminan en vertederos o contaminando el medio ambiente (Tsakona & Rucevska, 2020). Entre estos desechos, el Polietileno Tereftalato (PET) destaca por su presencia significativa en los vertederos (Frigione, 2010), representando millones de toneladas de material desechado anualmente (Alfarisi & Primadasa, 2018). Aunque el PET en sí mismo no es inherentemente perjudicial para el medio ambiente, su lenta degradación y acumulación en los vertederos plantean desafíos ambientales importantes (Geyer et al., 2017; Reis et al., 2011).

El reciclaje del PET ofrece una solución prometedora para abordar este problema, al tiempo que reduce la dependencia de recursos no renovables y genera oportunidades económicas. A través de diversas tecnologías de reciclaje, se pueden recuperar materiales y energía a partir de desechos plásticos (Mohamed et al., 2014; Pacheco et al., 2012), lo que no solo reduce la cantidad de residuos enviados a vertederos, sino que también disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con métodos de eliminación más tradicionales, como la incineración (Shen et al., 2011). En el contexto de la construcción, donde se genera una cantidad significativa de residuos, el uso de plásticos reciclados, como el PET, ofrece una alternativa sostenible al hormigón y otros materiales convencionales.

La construcción, siendo una de las industrias más importantes y generadoras de residuos, presenta una oportunidad clave para la adopción de prácticas más sostenibles y la integración de materiales reciclados (Jiménez et al., 2018). Esta industria busca productos flexibles y adaptables a cambios de usuarios (Wee & Aurisicchio, 2018), donde la modularización permite reconfiguraciones rápidas sin alterar la forma (Wee & Aurisicchio, 2018). La construcción modular mejora la productividad, calidad y tiempos (Hyun et al., 2020), reduciendo la obsolescencia por cambios demográficos y estilos

Uso de Residuos Plásticos para Construcción de Escaleras en Viviendas de Interés Social

de vida (The Ellen Macarthur Foundation, 2015). Este enfoque podría ahorrar anualmente 20 billones de dólares y reducir desechos en un 70% (Bertram et al., 2019; Hyun et al., 2020), reutilizando el 80% de los componentes y prolongando la utilidad de las viviendas (The Ellen Macarthur Foundation, 2015). La construcción modular promueve sitios más sostenibles con desmontaje cuidadoso de materiales y manejo de desechos (Dodge Data & Analytics, 2020).

En el caso de Ecuador, donde el déficit de vivienda es significativo y el uso de hormigón armado es común en la construcción de viviendas de interés social, la implementación de soluciones basadas en plásticos reciclados podría tener un impacto positivo tanto en términos de sostenibilidad ambiental como de acceso a la vivienda. El déficit cualitativo de vivienda hasta el año 2010 en el Ecuador era del 33.12% (Rodas, 2013) y hasta el año 2017 un poseía un déficit cuantitativo del 13.4% (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda de Ecuador -MIDUVI, 2019), el déficit de vivienda en la actualidad se ha estimado alrededor de las 500000 unidades (El Telégrafo, 2021).

El objetivo de este estudio es proponer un diseño modular de escalera fabricada con plástico reciclado, destinado a ser utilizado en viviendas de interés social, con el propósito de reducir los tiempos de construcción, la huella de carbono y los costos asociados. Se busca desarrollar un sistema de ensamblaje modular que permita una construcción más eficiente y liviana en el sitio de trabajo. El estudio también incluye la comparación del tiempo de montaje y la huella de carbono entre las escaleras modulares de plástico reciclado y las convencionales de hormigón armado, así como la determinación del costo de las escaleras plásticas en comparación con las de hormigón. La pregunta de investigación plantea si la implementación de este tipo de escaleras, junto con su sistema de ensamblaje modular, puede efectivamente cumplir con los objetivos de reducción de peso, optimización de tiempos, disminución de la huella de carbono y abaratamiento de costos en viviendas de interés social en Ecuador.

Metodología

Se utilizó una metodología comparativa y experimental que incluyó la construcción y modelación virtual de una escalera convencional de hormigón armado, seguida del diseño y análisis de una escalera de PET reciclado con un sistema modular de ensamblaje. Se evaluaron dos alternativas modulares, seleccionando la más estable. Posteriormente, se compararon ambos sistemas constructivos en términos de peso total, resistencia, tiempos de edificación, huella de carbono, costos y flexibilidad, utilizando software especializado para asegurar una evaluación detallada y rigurosa.

Como primer paso, se realizó el proceso de construcción de una escalera convencional de hormigón armado, utilizando la normativa vigente y la técnica tradicional de construcción, caracterizada por el uso de encofrado de madera, armadura de acero y hormigón. Para esta tarea, se utilizó software especializado para generar una modelación virtual que permitiera la realización de diferentes análisis estructurales y de rendimiento.

El segundo paso consistió en el diseño de una escalera cuyo material base fue el PET reciclado en lugar del hormigón armado. Se utilizaron las mismas normas aplicadas a la escalera convencional, con el objetivo de obtener escaleras homogéneas en dimensiones y forma. Para la construcción de la escalera de material plástico, se creó un sistema modular de ensamblaje. Este diseño también fue analizado mediante el uso de software especializado para evaluar su rendimiento estructural y funcional.

Se evaluaron dos alternativas modulares de escaleras, seleccionando la segunda opción por ofrecer mayor estabilidad estructural. Posteriormente, se compararon los resultados obtenidos con los del sistema constructivo convencional presentado en el primer paso.

Las variables analizadas en cada sistema constructivo fueron: peso total, resistencia, tiempos de edificación, huella de carbono, costos y flexibilidad. Los análisis permitieron una evaluación detallada de las ventajas y desventajas de cada método, proporcionando una base sólida para determinar la viabilidad y sostenibilidad de la escalera de PET reciclado en comparación con la de hormigón armado.

Normativas construcción escaleras

- *Dimensionamiento de una Escalera:* Según el Código Ecuatoriano de la Construcción con respecto a Requisitos de Diseño y Construcción de Escaleras (Instituto Ecuatoriano de Normalización-INEN, 1984), es necesario que se cumplan con ciertos componentes antropométricos y ergonómicos los cuales tienen como objetivo conseguir una circulación vertical con cualidades de funcionamiento y comodidad.
- *Profundidad de Peldaño o Huella:* La profundidad de la huella debe poseer una medida que brinde la posibilidad de apoyar sobre ella la planta del pie y cuando menos una porción del talón firmemente, sin necesidad de situar el pie de forma incomoda, por lo que se recomienda una huella que se mantenga en un rango entre 250 mm y 300 mm (INEN, 1984).

- *Altura de Peldaño o Contrahuella:* Se debe hacer lo posible por evitar peldaños demasiado altos, ya que estos pueden provocar tropiezos a las personas menos hábiles, individuos de la tercera edad o niños, que tienen dificultad para superar las contrahuellas cuando estas superan los 230 mm o cuando son inferiores a los 75 mm.
- *Ancho de Peldaño:* Según (INEN, 1984) la medida adecuada para el ancho de los peldaños de una escalera para vivienda está entre los 800mm a 900mm, si es que va a dejarse un lado descubierto, y en el caso de que se decida construir la escalera entre paredes, se debe optar por un ancho de peldaños de 900 a 1000mm. (INEN, 1977).

Resultados

Diseño escalera convencional de hormigón armado

El hormigón es un material altamente versátil y esencial para el desarrollo de infraestructuras en una sociedad próspera, pero su producción tiene un significativo impacto ambiental, lo que impone cautela en su uso y fabricación (Nielsen, 2008). Este material es el más comúnmente empleado en la construcción de viviendas de interés social, tanto unifamiliares como multifamiliares. Sin embargo, presenta ciertas desventajas, tanto a nivel ambiental, como en el tiempo prolongado necesario para su edificación, sus costos y el considerable peso de las estructuras de hormigón (Ponce, 2017).

Para la creación de la escalera de hormigón, se empleó un encofrado tradicional utilizando puntales de madera y tablas dispuestas diagonalmente para fijarlos. Una vez fijados los puntales, se colocan cuarterones sobre ellos como soporte para la armadura de acero. La armadura de acero se dispone sobre la mesa, utilizando separadores de hormigón llamados galletas para garantizar un adecuado recubrimiento (ver figura 1). La armadura se compone de varillas de acero de 12 mm formando una cuadrícula de 0.15m x 0.15m. Finalmente, el hormigón utilizado debe cumplir con la normativa ecuatoriana de resistencia y se recomienda su desencofrado después de 21 días.

Uso de Residuos Plásticos para Construcción de Escaleras en Viviendas de Interés Social

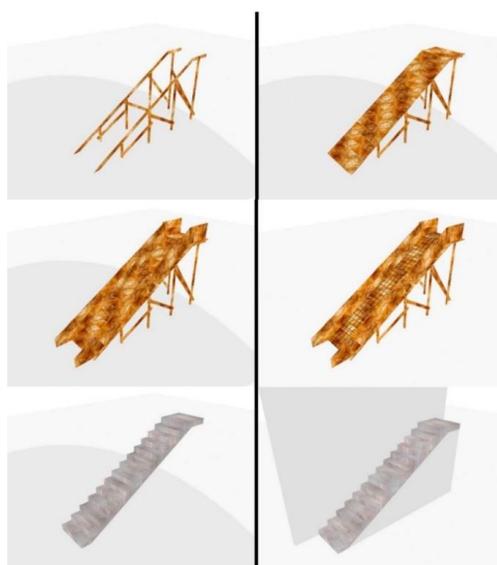


Figura 1. Proceso creación escalera de hormigón armado

Tabla 1. Resultados Escalera de Hormigón Armado

Variable	Resultado	Observaciones
Peso	8027.86 kg	Una vez que han sido modelados los elementos principales de la escalera como son la armadura y el hormigón.
Resistencia	7.84 kN/m ² totales	Esto quiere decir que sumando las cargas de cada escalón y siendo 14 escalones el producto.
Deformación	0.1169 mm	Esto una vez que se le haya aplicado los 7.84 kN/m ² a la escalera.
Tiempos	23 días y medio	La construcción de una escalera recta generalmente implica dos días de trabajo para completar tareas como el encofrado, la colocación de la armadura, el timbrado de contrahuellas y el vertido de hormigón. Sin embargo, el desencofrado no puede realizarse hasta después de 21 días, cuando el hormigón alcanza la resistencia necesaria. Esta tarea es delicada y requiere cuidado para evitar daños en los bordes de la escalera.
Huella de carbono	1605.57kgCO ₂	Para calcular la huella de carbono de la escalera de hormigón, es necesario multiplicar la cantidad de dióxido

Uso de Residuos Plásticos para Construcción de Escaleras en Viviendas de Interés Social

		de carbono (CO ₂) contenido en un kilogramo de hormigón por el peso total de la escalera a ser construida.
Costo	\$573.37	Para estimar el presupuesto de construcción de la escalera de hormigón, se consideraron los costos de acero de refuerzo, hormigón simple para la escalera y encofrado horizontal. Además, se decidió incluir los honorarios de la mano de obra dentro del costo del encofrado.
Flexibilidad		El método de construcción con hormigón armado tiene limitada flexibilidad, ya que no puede ser fácilmente reconfigurado. Los cambios en la circulación vertical suelen requerir derribos parciales o totales del elemento, lo cual implica la intervención de personal especializado y la realización de actividades iniciales como encofrado y colocación de refuerzos de hierro.

Diseño Escalera Modular a base de plástico reciclado

Como alternativa al uso del hormigón, se han investigado diversas tecnologías para abordar el problema del desecho plástico, destacando las basadas en reciclaje por su capacidad de recuperar materiales y energía (Mohamed et al., 2014). Las investigaciones muestran que el reciclaje de plásticos es el método con menor emisión de gases de efecto invernadero y menor impacto ambiental comparado con la incineración o el relleno sanitario (Dormer et al., 2013; Shen et al., 2011).

Para fabricar las escaleras modulares con plástico reciclado, se utilizó Polietileno Tereftalato Reciclado (PETr), un material derivado de productos originalmente hechos con PET. El reciclaje de PET ofrece varios beneficios ambientales: cada tonelada de plástico reciclado ahorra 6.76 metros cúbicos de espacio en rellenos sanitarios (Satapathy, 2017) y equivale a un ahorro de 3.8 barriles de petróleo, además de reducir las emisiones en un 71% y el consumo de energía en un 84%. La energía necesaria para producir resina PET es de 31.9 Btu por cada 1000 libras, mientras que para generar resina PETr solo se requieren 5.1 Btu por cada 1000 libras (Salminen, 2013).

En cuanto a los métodos de procesamiento de termoplásticos, se utilizó el moldeo por inyección. Este proceso consiste en llenar moldes con plástico derretido a altas presiones, que luego se enfría y solidifica, adoptando la forma del molde. Este método es ampliamente utilizado por su capacidad para producir grandes cantidades de piezas con formas y texturas complejas (Bayer MaterialScience, 2000). Por esta razón, es el más adecuado para crear los módulos, ya que ofrece una gran variedad de opciones para resolver problemas en el diseño de las piezas.

Diseño de Módulos

La literatura estudiada estipula que, para lograr un sistema modular funcional, se debe descomponer un sistema complejo en elementos más simples o pequeños. Por lo tanto, ese fue el objetivo principal durante las etapas de diseño del sistema modular. Para realizar una modularización, se pensó en la escalera a producir como un tramo a nivel de esquema, para que sea más sencillo someterlo a diferentes ensayos.

Debido a que los módulos definitivos van a ser partes creadas a partir de material plástico, es necesario que se haga uso de ciertos criterios de diseño, con la finalidad de que dichos módulos también puedan ser fabricados, los más importantes a ser tomados en cuenta, son el ángulo de salida y el uso de aristas redondeadas. Se recomienda que las paredes de los moldes tengan una inclinación mínima de 0.5 grados, para facilitar la eyección de las piezas. Un ángulo mayor reduce la probabilidad de dañar las piezas al ser eyectadas. Las superficies lisas requieren ángulos de salida menores (Bayer MaterialScience, 2000). En relación a las esquinas, es crucial evitar esquinas afiladas en los diseños, ya que concentran tensiones y reducen el rendimiento mecánico de las piezas. El radio mínimo recomendado es de 1.12 mm, aunque un exceso en el redondeamiento puede encarecer los moldes (Bayer MaterialScience, 2000). En la Figura 2 se observa que las esquinas de todos los módulos fueron redondeadas con un radio de 3 mm para cumplir con este criterio.

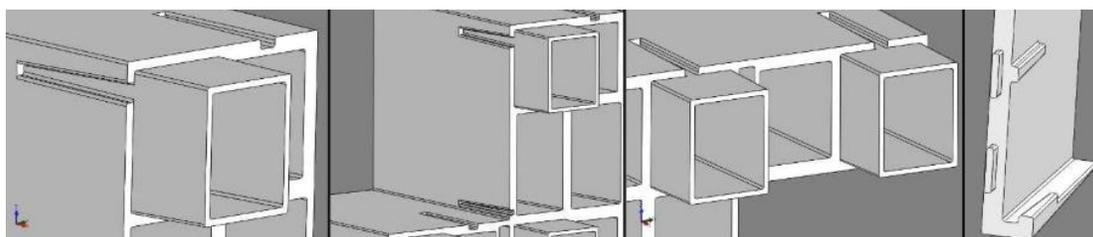


Figura 2. Ángulos de salida y esquinas redondeadas

Módulos Finales

El módulo 1 es el más pequeño, posee los elementos mencionados en los apartados anteriores, como paredes con ángulos de salida y esquinas redondeadas, así como también la unión de caja y espiga. También posee tres canales que son utilizados para el emplazamiento del módulo 4 (ver figura 3).

Uso de Residuos Plásticos para Construcción de Escaleras en Viviendas de Interés Social

El módulo 2 es el más importante y complejo de todos, su importancia yace en su capacidad de trabar al módulo 1 y 3, formando así huellas y contrahuellas. Posee al igual que el módulo 1, cajas y espigas, así como también canales guía para la colocación y fijación del módulo 4 (ver figura 3).

El módulo 3, se diferencia del módulo 1 y 2 debido a su capacidad de formar descansos. También cajas y espigas, así como los canales para la ubicación del módulo 4 (ver figura 3).

El módulo 4, tiene como finalidad servir como una tapa que pierde las juntas de las huellas, pero principalmente corrige la inclinación de un grado que poseen las huellas y consigue que las escaleras tengan un ángulo de 0 grados. Al igual que los otros módulos utiliza la unión de caja y espiga. Además, posee a diferencia de los otros módulos, unas aletas guía (flechas azules) y de fijación (flechas rojas). Es importante mencionar que este módulo posee una variante de sí mismo, que se consigue mediante ligeros cambios en el molde que lo produce, su combinación con esta variante permite la creación de descansos junto con el módulo 3 (ver figura 3).

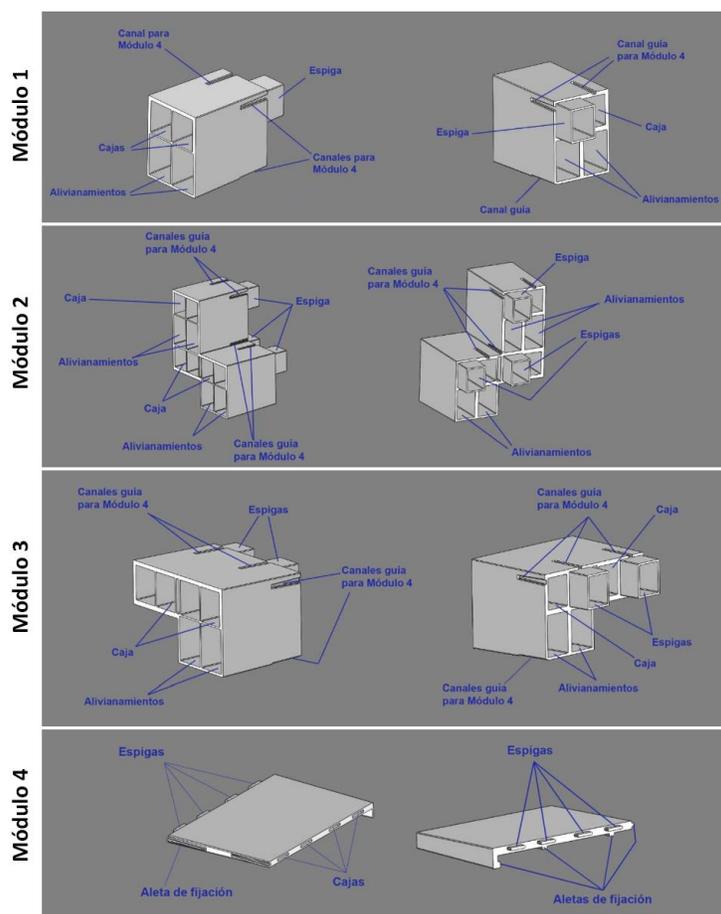


Figura 3. Módulos finales

Las dimensiones finales de los módulos son 20 cm x 14 cm x 18 cm (ver figura 4). Estas medidas permiten que, al combinarse, formen huellas de 28 cm y contrahuellas de 18 cm. La dimensión de 20 cm facilita que, al combinarse horizontalmente, los módulos puedan crear peldaños de 1 metro de ancho. Además, es posible sumar más módulos para obtener peldaños con dimensiones superiores a 1 metro.

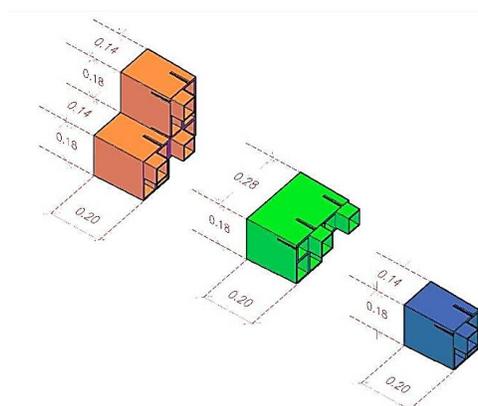


Figura 4. Dimensiones Módulos finales

Ensamblado

Para el proceso de ensamblaje, primero se colocan el módulo 3 y el módulo 4, combinándolos. Luego se añade el módulo 1 al conjunto formado por los módulos 3 y 4, seguido por el módulo 2 junto al módulo 1, asegurando estos con otro módulo 4. A continuación, se incorpora un módulo 3 y un módulo 4 previamente combinados, seguido por un módulo 2. Después, se añade un módulo 4 para asegurar el último módulo 2. Se repite el paso de agregar el módulo 1 y el módulo 4 previamente ensamblados (ver figura 5). Estos pasos se repiten para continuar generando las huellas y contrahuellas necesarias, añadiendo módulos 3 y 4 preensamblados conforme al proceso descrito. En la figura 6 se presenta la escalera ensamblada completamente.

Uso de Residuos Plásticos para Construcción de Escaleras en Viviendas de Interés Social

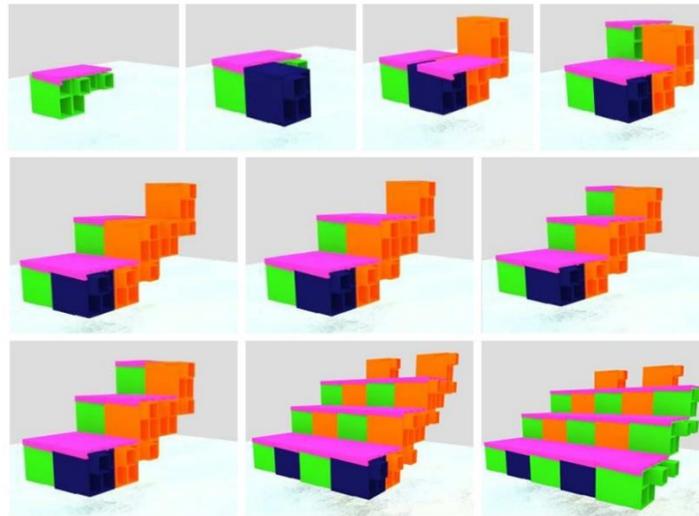


Figura 5. Proceso de ensamblaje de los módulos

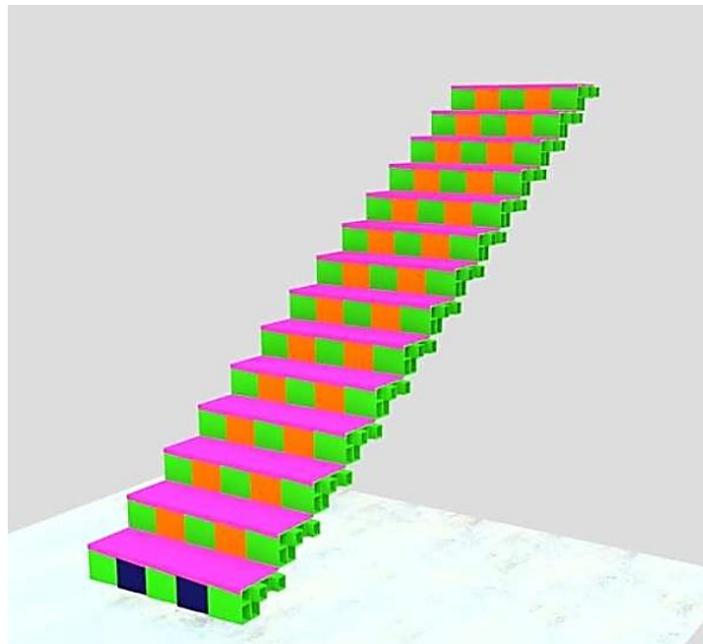


Figura 6. Escalera PETr ensamblada

Para anclar este ensamblaje a la losa, la losa debe tener las siguientes formas que permitan conectar la escalera propuesta con el siguiente nivel de llegada.

Uso de Residuos Plásticos para Construcción de Escaleras en Viviendas de Interés Social

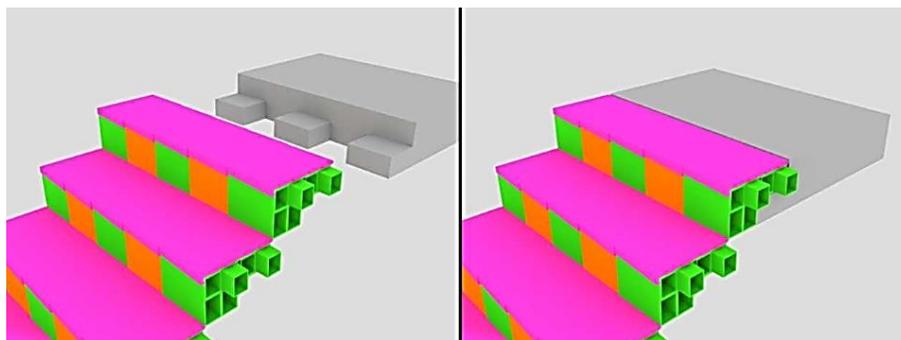


Figura 7. Detalle de anclaje de escalera con la losa.

Para el reforzamiento de módulos, es necesario añadir elementos estructurales denominados "atiesadores" en cada módulo para aumentar la inercia del sistema modular. Estos refuerzos pueden incorporarse sin alterar la forma original de los módulos, utilizando el mismo molde con el que se crearon los módulos iniciales. Este molde puede producir elementos volumétricos sólidos que actúan como tapones y, una vez colocados dentro de los módulos, funcionan como atiesadores, mejorando la inercia de todo el sistema modular.

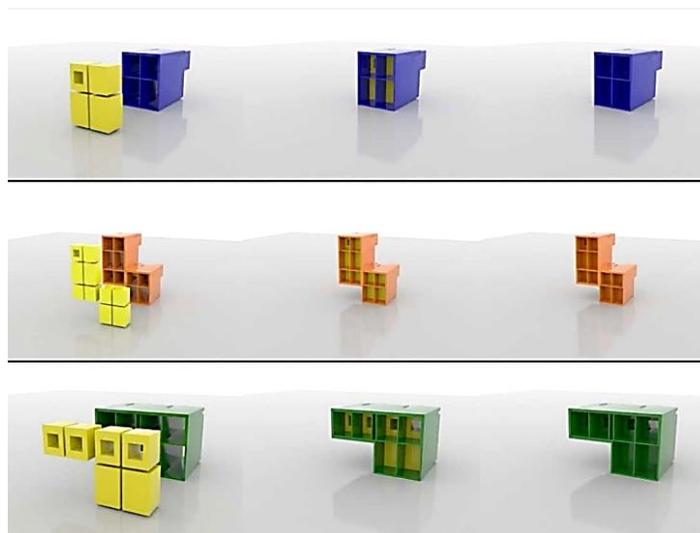


Figura 8. Proceso de reforzamiento de módulos

Uso de Residuos Plásticos para Construcción de Escaleras en Viviendas de Interés Social

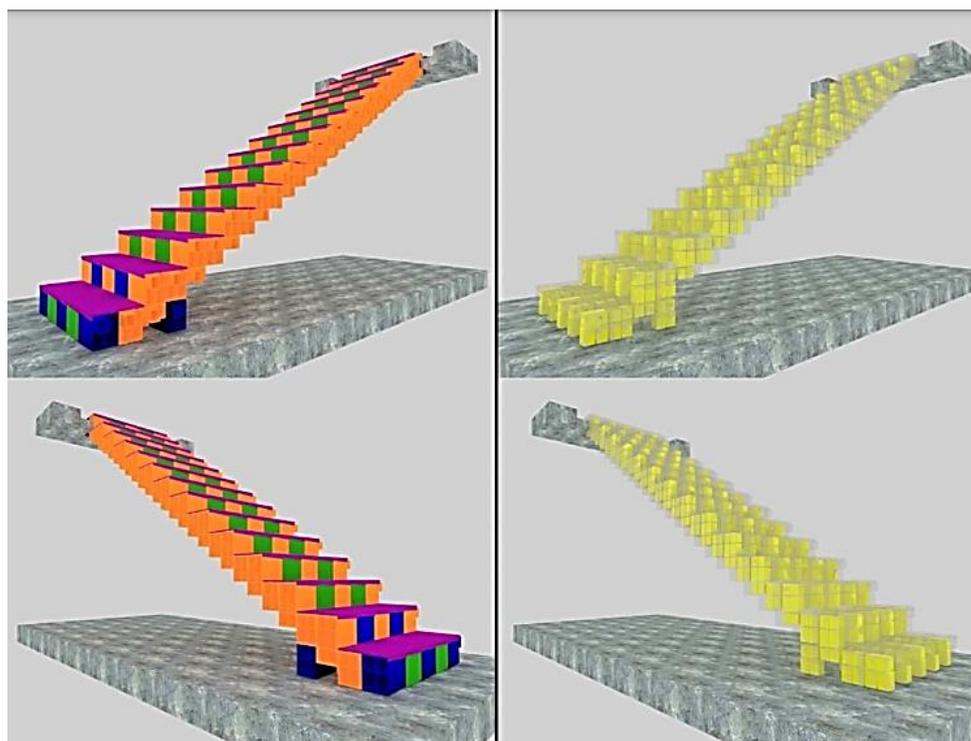


Figura 9. Escalera PETr ensamblada y reforzada

Tabla 2. Resultados Escaleras reforzadas a base de PETr

Variable	Resultado	Observaciones
Peso	561.91 kg,	La escalera reforzada a base de PETr está conformada por 148 módulos en total.
Resistencia	7.84 kN/m2 totales	Basado en la sumatoria de las cargas de todos los escalones.
Deformación	10.21 mm	Esto una vez que se le haya aplicado los 7.84 kN/m2 a la escalera.
Tiempos	4 horas	Una vez realizados los módulos, unirlos toma 1 minuto y se necesitan 148 módulos para completar el sistema modular, se estima un tiempo de montaje de 74 minutos. Sin embargo, considerando posibles inconvenientes, este tiempo podría triplicarse a 222 minutos, aproximadamente 4 horas. Además, el sistema modular puede ser utilizado inmediatamente después del montaje, ya que no necesita tiempo adicional para alcanzar una resistencia mínima.

Uso de Residuos Plásticos para Construcción de Escaleras en Viviendas de Interés Social

Huella de carbono	509.09 kgCO ₂	Para obtener el valor total de emisión de carbono del sistema se debe multiplicar el peso total que es de 561.91 kg de PETr, por la cantidad de carbono que emite cada kilo de material.
Costo	\$570.63	Para este cálculo, se sumaron los costos de los módulos 1, 2, 3, y 4 (148000 módulos), junto con el anclaje superior, el anclaje inferior y los dados de hormigón. Se utilizó el precio de \$7.58 por libra de PETr (RecyclingMarkets.net Staff, 2021).
Flexibilidad	El sistema modular reforzado mantiene su capacidad de ser desmontado para recuperar y reutilizar sus elementos. La combinación de estos elementos puede formar descansos, paredes de apoyo y otros tipos de escaleras. Los 148 módulos que componen la escalera recta del estudio pueden transportarse en un pallet de 1.20 m x 1.00 m.	

Comparación escaleras convencionales de hormigón armado y modulares de plástico reciclado

Tabla 3. Comparación escaleras de hormigón y modulares de plástico reciclado

Variable	Hormigón armado	Plástico reciclado
Peso	8027.86 kg	561.91 kg,
Resistencia	7.84 kN/m ² totales	7.84 kN/m ² totales
Deformación	0.1169 mm	10.21 mm
Tiempos	23 días y medio	4 horas
Huella de carbono	1605.57kgCO ₂	509.09 kgCO ₂
Costo	\$573.37	\$570.63
Flexibilidad	Limitada flexibilidad, no puede ser fácilmente reconfigurado, ni transportado.	Capacidad de ser desmontado, transportado y reutilizar sus elementos.

Como se puede observar en la tabla 3, el sistema modular de material plástico (561.91Kg) es 14 veces menor al de su similar de hormigón armado (8027.86kg). Al demostrarse que el sistema propuesto era más liviano que su equivalente en hormigón fue preciso someterlo a un análisis que ponga a

Uso de Residuos Plásticos para Construcción de Escaleras en Viviendas de Interés Social

prueba su capacidad para soportar las cargas que serían provocadas por el peso de los usuarios al momento de su utilización, motivo por el cual fue expuesto a una fuerza de 7.84 kN/m^2 , o 799.46 kg al llegar a esta carga se producirá una deformación de 12 mm , pero para que ello ocurra, sería necesario que unas 10 personas de aproximadamente 80 kilos estén sobre ella al mismo tiempo. En relación al tiempo, la propuesta de hormigón, requiere de al menos dos días para la realización de las tareas de construcción, sin contar las semanas necesarias para que el elemento alcance su resistencia mínima. Mientras que el sistema modular de plástico solo necesita de unas cuantas horas para ser armado y puede ser utilizado apenas se han culminado las tareas de montaje. Por lo tanto, se demuestra que la utilización del sistema propuesto reduciría el tiempo en el cual se realizan las tareas de construcción de una vivienda de interés social.

Por otra parte, en relación a la reducción de gases de efecto invernadero, como siguiente objetivo a ser solucionado se menciona a la huella de carbono. La evaluación de este aspecto necesitó de la realización de cálculos mediante los cuales se demostró que la huella de carbono producida por la escalera a base de (PETr) (509.09 kgCO_2), llega a ser tres veces menor si se compara con la huella de carbono producida por su similar de hormigón armado (1605.57 kgCO_2). Por lo tanto, de ser utilizado el sistema modular a base de 157 (PETr) en una vivienda de interés social se contribuiría con la reducción de la huella de carbono producida por este tipo de residencias.

D igual manera, debido a que el sistema propuesto está pensado para ser utilizado en viviendas de interés social, donde una de las cuestiones más importantes es la económica, la implementación del sistema modular en este tipo de viviendas depende de este aspecto, por lo tanto, el costo del sistema cuando menos debía ser equivalente al de su similar de hormigón para que su ejecución fuera factible. Una vez realizados los cálculos, revelaron que el costo del sistema modular propuesto depende directamente de la cantidad de elementos que se producen, a medida en que más módulos sean elaborados el costo de la escalera comenzará a disminuir. Incluso a partir de la producción de 148000 módulos (1000 escaleras), el precio de la escalera modular se equilibra con el precio de la escalera de hormigón y a medida que la cantidad de módulos continúe incrementándose el costo total del sistema modular puede ser incluso menor que el requerido para la construcción de una escalera de hormigón. En relación a la flexibilidad, las escaleras de hormigón tienen una flexibilidad limitada, ya que no pueden reconfigurarse ni transportarse fácilmente. Son estructuras permanentes y pesadas, lo que dificulta su modificación o reutilización. En contraste, el sistema modular de plástico reciclado ofrece una notable versatilidad, ya que puede desmontarse, transportarse y reutilizarse con facilidad. Esto

permite adaptarse a diferentes configuraciones y ubicaciones, facilitando su uso en diversas aplicaciones y reduciendo el impacto ambiental al prolongar la vida útil de sus componentes.

Conclusiones

El objetivo de esta investigación fue crear un sistema de ensamblaje modular a partir de material plástico reciclado para la construcción de escaleras, motivado por la contaminación plástica global. Este sistema fue diseñado para su implementación en viviendas de interés social, con el fin de reducir tiempos de construcción, huella de carbono y costos. Para evaluar la viabilidad de esta propuesta, se comparó con el proceso de construcción de escaleras convencionales de hormigón armado.

Tras analizar los modelos iniciales y resolver varios problemas de diseño, se desarrolló un sistema modular que utiliza cuatro módulos para formar huellas y contrahuellas de una escalera. La forma y dimensiones de los módulos se determinaron aplicando criterios de modularización y prefabricación. Durante el desarrollo, se empleó software especializado para generar modelos virtuales y analizar sus propiedades mecánicas y la viabilidad de producir los módulos con PET reciclado. Se ensamblaron los módulos hasta alcanzar las dimensiones adecuadas para el ancho de los peldaños y la altura del entrepiso. Se necesitaron 148 módulos de PET reciclado para completar la escalera, logrando un peso significativamente menor que una escalera convencional de hormigón. Esto disminuye la carga muerta y permite reducir las dimensiones de los elementos estructurales, disminuyendo la carga sísmica.

El sistema modular también permite la reconfiguración de las escaleras, proporcionando flexibilidad para futuros cambios en el inmueble, una cualidad esencial para la vivienda social que las escaleras de hormigón armado no poseen. Además, reciclar plásticos de un solo uso como el PET para la construcción evita su rápida reincorporación a la cadena de desechos, prolongando su uso por años y mitigando la contaminación.

En la comparación con el sistema de hormigón armado, el sistema modular de plástico, al ser significativamente más liviano que su contraparte de hormigón, agiliza el proceso de construcción de viviendas de interés social, reduciendo tanto el tiempo como los costos asociados. Además, su capacidad para soportar cargas y su menor huella de carbono lo hacen una opción más sostenible y ecoamigable. Económicamente, su costo se equipará al de las escaleras de hormigón a medida que se producen más módulos, e incluso puede ser más rentable a gran escala. Su flexibilidad y facilidad de

transporte y montaje ofrecen una ventaja adicional sobre las estructuras de hormigón, permitiendo su adaptación a diversas configuraciones y reduciendo su impacto ambiental al prolongar su vida útil. Es así que, mediante este análisis, se comprobó que el sistema modular cumple con varios principios de la economía circular: recicla desechos, reutiliza material sin infrarreciclaje, incrementa el valor del material reciclado y permite el intercambio y recuperación de componentes gracias a su capacidad de deconstrucción. De esta manera las escaleras elaboradas con PET reciclado mediante un sistema modular de ensamblaje reducen el peso, acortan los tiempos de construcción, disminuyen la huella de carbono y los costos en viviendas de interés social en Ecuador.

Como recomendaciones para futuras investigaciones, se sugiere implementar un barandal que pueda fijarse directamente sobre los módulos, proporcionando protección y estética adicional. También se recomienda añadir un sistema de seguridad anti desacople “SnapFit” en las uniones de los módulos. Este método de unión económico y eficiente aumenta las posibilidades de reciclaje al evitar el uso de elementos metálicos y facilita el desacople de las partes.

Referencias

1. Alfarisi, S., & Primadasa, R. (2018). Carbon Footprint and Life Cycle Assessment of PET Bottle Manufacturing Process. Proceedings of the The 1st International Conference on Computer Science and Engineering Technology. Universitas Muria Kudus, January. <https://doi.org/10.4108/eai.24-10-2018.2280596>
2. Bayer MaterialScience. (2000). Part and Mold Design - A Design Guide. Bayer Corporation, 174. <http://www.bayer.com/polymers-usa>
3. Bertram, N., Fuchs, S., Mischke, J., Palter, R., Strube, G., & Woetzel, J. (2019). Modular construction: From projects to products. McKinsey & Company: Capital Projects & Infrastructure, 1, 1-34. <https://www.ivvd.nl/wp-content/uploads/2019/12/Modular-construction-from-projects-to-products-full-report-NEW.pdf>
4. Da Rosa Oliveira, A. K., Beraldo, C., & Santana, R. (2011). Reciclaje de PET: evaluación de la eficiencia de separación del contaminante PVC. Revista Eciperú, 8(1), 7-7. <https://doi.org/10.33017/RevECIPeru2011.0002/>
5. Dodge Data & Analytics. (2020). Prefabrication and Modular Construction 2020 SmartMarket Report. SmartMarket https://proddrupalcontent.construction.com/s3fs-public/SMR1219_Prefab_2020_small-compressed.pdf

Uso de Residuos Plásticos para Construcción de Escaleras en Viviendas de Interés Social

6. Dormer, A., Finn, D. P., Ward, P., & Cullen, J. (2013). Carbon footprint analysis in plastics manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 51, 133-141. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.01.014>
7. El Telégrafo. (2021). El déficit de vivienda en Ecuador, no solo es un problema numérico sino de calidad. <https://bit.ly/3oPr6Jz>
8. Frigione, M. (2010). Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete. *Waste management*, 30(6), 1101-1106. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.01.030>
9. Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science advances*, 3(7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
10. Hyun, H., Kim, H., Lee, H. S., Park, M., & Lee, J. (2020). Integrated design process for modular construction projects to reduce rework. *Sustainability (Switzerland)*, 12(2), 1–19. <https://doi.org/10.3390/su12020530>
11. Instituto Ecuatoriano de Normalización [INEN]. (1977). *Uso de Medidas para la Vivienda Escaleras para Vivienda Particular*. <https://goo.gl/ViTfE2>
12. Instituto Ecuatoriano de Normalización [INEN]. (1984). *Código Ecuatoriano de la Construcción. Requisitos de Diseño y Construcción de Escaleras*. <https://goo.gl/yedbFa>
13. Jiménez, L. F., Dominguez, J. A., & Vega-Azamar, R. E. (2018). Carbon footprint of recycled aggregate concrete. *Advances in civil engineering*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/7949741>
14. Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda de Ecuador [MIDUVI]. (2019). “Proyecto de vivienda casa para todos - CPT”. <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/06/PROYECTO-DE-VIVIENDA-CASA-PARA-TODOS.pdf>
15. Mohamed, R. M. S., Misbah, G. S., Wurochekke, A. A., & Mohd. Kassim, A. H. B. (2014). Energy recovery from polyethylene terephthalate (PET) recycling process. *GSTF Journal of Engineering Technology (JET)*, 2, 1-6. <https://doi.org/10.7603/s40707-013-0012-9>
16. Nielsen, C. V. (2008). Carbon footprint of concrete buildings seen in the life cycle perspective. *Proceedings of the NRMCA*. <https://trid.trb.org/View/919733>
17. Pacheco, E. B., Ronchetti, L. M., & Masanet, E. (2012). An overview of plastic recycling in Rio de Janeiro. *Resources, Conservation and Recycling*, 60, 140-146. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.12.010>

18. Ponce, J. V. (2017). Evaluación de viviendas de interés social y prioritario a base del análisis técnico y de calidad de un proyecto inmobiliario tipo. Caso: “urbanización Los Capulíes” de la ciudad de Cuenca [Tesis de Pregrado, Pontificia Universidad Católica del Ecuador]. <https://repositorio.puce.edu.ec/handle/123456789/26294>
19. Reis, J. M. L., Chianelli-Junior, R., Cardoso, J. L., & Marinho, F. J. V. (2011). Effect of recycled PET in the fracture mechanics of polymer mortar. *Construction and Building Materials*, 25(6), 2799-2804. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.056>
20. Rodas, A. P. (2013). La habitabilidad en la vivienda social en Ecuador a partir de la visión de la complejidad: elaboración de un sistema de análisis. *Cuadernos De Vivienda Y Urbanismo*. <https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/cvyu/article/view/5924>
21. Salminen, P. (2013). Using recycled polyethylene terephthalate (PET) in the production of bottle trays. (Degree Thesis Plastics Technology). Arcada, Helsinki.
22. Satapathy, S. (2017). An analysis of barriers for plastic recycling in the Indian plastic industry. *Benchmarking: An International Journal*, 24(2), 415-430. <https://doi.org/10.1108/BIJ-11-2014-0103>
23. Shen, L., Nieuwlaar, E., Worrell, E., & Patel, M. K. (2011). Life cycle energy and GHG emissions of PET recycling: change-oriented effects. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16, 522-536. <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0296-4>
24. The Ellen Macarthur Foundation. (2015). Growth Within: A Circular Economy Vision for a Competitive Europe. Recuperado el 21 de Mayo de 2020, de <https://bit.ly/2Xic4QL>
25. Tsakona, M., & Rucevska, I. (2020). Plastic Waste Background Report. United Nations Environment Programme.
26. Wee, T., & Aurisicchio, M. (2018). Modularisation for Construction: A Data Driven Strategy. DS 91: Proceedings of NordDesign 2018, Linköping, Sweden, 14th-17th August 2018. <https://www.designsociety.org/publication/40950/Modularisation+for+Construction%3A+A+Data+Driven+Strategy>