

Diseño de un proceso de fabricación de bloques de construcción compuestos, utilizando plásticos reciclados como materia prima

Farledys Gonzalez Rhenals

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniera Metalúrgica

Director

Sergio Ismael Blanco Vásquez

Dr. en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de ingeniería Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Ingeniería Metalúrgica

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

Dedico mi tesis principalmente a Dios, por darme la sabiduría y la fortaleza necesaria para culminar esta meta. A mis padres, Fabio Gonzalez y Anabel Rhenals, por su apoyo incondicional, por brindarme sus palabras de aliento, por ser mi mayor fuente de inspiración para mi crecimiento personal y profesional. También a mis hermanos, Jhulian y Sheila por siempre creer en mis capacidades, por verme como ejemplo e impulsarme a lograr lo que me propongo. A mi abuela Concepción, por su apoyo moral y motivarme a seguir hacia adelante. También se la dedico a mi abuelo, Tulio, ése ángel que desde el cielo ha sido mi rayo de luz que me daba fuerzas para continuar. Gratitud a toda mi familia por estar siempre presentes en cada paso de mi vida y a todas las personas que a lo largo de este camino me he cruzado y contribuyeron su granito de arena a esta foránea, y finalmente, a mi director de tesis, Sergio Blanco, por creer en mí y quien con su dirección, conocimiento, enseñanza y colaboración permitió el desarrollo de este trabajo.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	8
1. Objetivos	10
1.1 Objetivo general	10
1.2. Objetivos específicos	10
2. Fundamentación teórica	11
2.1. Estado del arte	11
2.2. Marco teórico	13
3. Metodología	16
4. Resultados	18
5. Recomendaciones	40
6. Conclusiones	41
Referencias Bibliográficas	42
Apéndices	46

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1	15
Requisitos para la resistencia a la compresión.....	16
Tabla 2	16
Requisitos para el contenido de humedad tipo 1.	16
Tabla 3	26
Cuadro comparativo de 2 tipos de PET en cuanto a Propiedades físicas, mecánicas, térmicas, permeabilidad, procesamiento, durabilidad; la energía, el CO2 y consumo de agua en la producción primaria, el procesamiento y reciclaje.	26
Tabla 4	30
Cuadro comparativo de 4 tipos de Polipropileno (PP) en cuanto a Propiedades físicas, térmicas, permeabilidad, procesamiento, durabilidad; la energía, el CO2 y consumo de agua en la producción primaria, el procesamiento y reciclaje.	30
Tabla 5	35
Media de las resistencias a la compresión.	35
Tabla 6	36
Media de las resistencias a la flexión.....	36
Tabla 7	36
Media de las resistencias a la tracción.	36

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1	11
Documentos encontrados por año y autor.....	11
Figura 2	15
Clasificación de Ladrillos/Bloques de concreto no estructurales	15
Figura 3	15
Clasificación de Ladrillos/Bloques de concreto estructurales	15
Figura 4	20
Diagrama de flujo de una planta para la fabricación de bloques de construcción con plástico reciclado.....	21
Figura 5	24
Diagrama comparativo de propiedades de los bloques.....	24
Figura 6	40
Diagrama de % volumétricos de plástico y hormigón vs resistencia efectiva.....	40

Resumen

Título: Diseño de un proceso de fabricación de bloques de construcción compuestos, utilizando plásticos reciclados como materia prima*

Autor: Farledys Gonzalez Rhenals**

Palabras Clave: plásticos reciclados, bloques de construcción compuestos, materia prima, vivienda.

Descripción: Uno de los aspectos que llama la atención en la actualidad mana de contemplar el impacto medioambiental en la construcción de viviendas. En ese sentido, la preocupación de la industria lleva a formular respuestas ecoamigables con en el entorno natural. Así, el presente proyecto de investigación estudia el proceso de fabricación de bloques de construcción compuestos, con base en plásticos reciclados como materia prima. La metodología utilizada en el proyecto está constituida por cuatro fases que promulgan en el diseño de un proceso general de fabricación de los bloques, y la selección de materiales para materia prima con el aplicativo Ansys Granta Edupack. En los resultados se encuentra un diagrama general del proceso para fabricar los bloques, las propiedades de ladrillos comunes e ingenieriles y del hormigón como base para bloques tradicionales, también las propiedades de termoplásticos como el PET y el PP. Además, se utilizan el modelo de regla de las mezclas y el de Mori-Tanaka para hallar una aproximación a las propiedades mecánicas del ladrillo compuesto como la resistencia a la compresión, resistencia a la flexión y tracción. Por último, se concluye que si es posible crear modelos de construcción de viviendas que contribuyan en problemáticas como es la generación de plásticos y que fomenten la sostenibilidad en este sector.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Ingeniería Metalúrgica. Director: Sergio Ismael Blanco Vásquez. Dr. en Ingeniería.

Abstract

Title: Design of a manufacturing process for composite building blocks, using recycled plastics as raw material*

Author(s): Farledys Gonzalez Rhenals **

Key Words: Recycled plastics, Composite building blocks, Raw materials, Housing.

Description: One of the aspects that attracts attention today is the environmental impact of housing construction. In this sense, the concern of the industry leads to formulate eco-friendly responses to the natural environment. Thus, the present research project studies the manufacturing process of composite building blocks, based on recycled plastics as raw material. The methodology used in the project consists of four phases that involve the design of a general manufacturing process of the blocks, and the selection of materials for raw material with the Ansys Granta Edupack application. The results include a general diagram of the process to manufacture the blocks, the properties of common and engineering bricks and of concrete as a base for traditional blocks, as well as the properties of thermoplastics such as PET and PP. In addition, the rule of mixtures model and the Mori-Tanaka model are used to find an approximation to the mechanical properties of the composite brick such as compressive strength, flexural strength and tensile strength. Finally, it is concluded that it is possible to create housing construction models that contribute to problems such as the generation of plastics and promote sustainability in this sector.

* Degree work.

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Metallurgical Engineering. Director: Sergio Ismael Blanco Vásquez. Dr. in Engineering.

Introducción

La contaminación es una de las principales problemáticas de la humanidad que generan gran preocupación a nivel mundial y Colombia no es la excepción de ello ya que, se producen aproximadamente 12 millones de toneladas de residuos sólidos al año, y de estos solamente se recicla el 17%. Específicamente, la industria del plástico genera 1,25 millones de toneladas de residuos por año, de acuerdo al informe “Colombia mejor sin plásticos” publicado por (Greenpeace, 2018). Aunque se aprovechan más de 160 mil toneladas anuales de materiales plásticos en el país (Fajardo, 2021, sec. Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible), sigue siendo alarmante la cantidad de plásticos desechados que no son reutilizados y terminan en vertederos, zonas verdes o cuerpos de agua, por lo que resulta conveniente presentar propuestas que minimicen el impacto ambiental que está provocando el uso desmedido de plásticos, siendo la mayoría de un sólo uso. El plástico, de origen sintético u orgánico, se ha convertido en un material de suma importancia en sectores como el alimentario, construcción, transporte, medicina, electrónica y agricultura. La industria del plástico ha logrado un gran desarrollo económico que ha implicado un impacto antrópico, social y cultural, por lo que surgió la necesidad de clasificarlos para identificar, diferenciar y reciclar.

El reciclaje de plásticos tiene múltiples objetivos, que van desde la reutilización del material en la fabricación de botellas, hasta la elaboración de materiales compuestos con aplicación en construcción (Rdv, 2017) y vialidad (El uso del plástico para la construcción de carreteras, 2015).

Buscando alternativas que contribuyan a reducir la invasión de plásticos desechados en el medio ambiente y dándoles la oportunidad de ser reutilizados en el sector de la construcción, es

necesario realizar un estudio de oportunidades. Este proyecto está enfocado en la fabricación de bloques con los que puedan construirse viviendas como una opción que coopere la problemática habitacional. Para esto, debe realizarse un análisis que permita seleccionar un material plástico o combinación de plásticos, que se ajuste a las cualidades similares de los materiales tradicionales utilizados en la fabricación de bloques. Considerando todos los factores mencionados anteriormente, en el presente proyecto se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Es posible diseñar un proceso de fabricación de bloques de construcción utilizando plásticos reciclables como materia prima y que presenten propiedades mecánicas similares a los bloques de uso convencional?

De acuerdo con lo anterior, el presente proyecto aborda, en un primer momento los objetivos, luego la fundamentación teórica, desde una revisión bibliográfica, teórica-conceptual sobre los elementos relevantes, luego plantea la metodología, constituida por cuatro fases que llevan al diseño y construcción de los bloques compuestos. Finaliza con los resultados y las conclusiones.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Diseñar un proceso para la elaboración de bloques de construcción compuestos, utilizando plásticos reciclados como materia prima.

1.2. Objetivos específicos

Realizar un estudio comparativo de las propiedades mecánicas de bloques de construcción convencionales con bloques plásticos.

Clasificar y seleccionar plásticos reciclables útiles para la fabricación de ladrillos.

Diseñar un sistema para la fabricación de bloques a partir de plásticos reciclados.

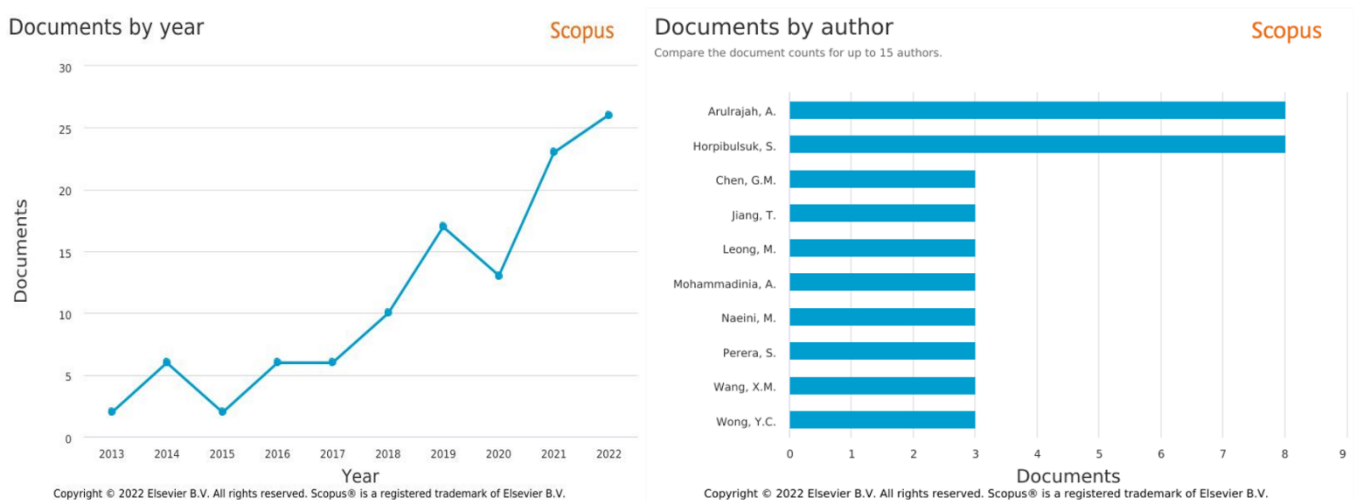
2. Fundamentación teórica

2.1. Estado del arte

Con el fin de evaluar la pertinencia del tema y el interés de la comunidad científica se analizaron las fuentes de información para abordar el uso de materiales alternativos en la construcción de viviendas. La búsqueda se realizó teniendo en cuenta las palabras claves: construcción; ladrillos; plástico; y reciclaje. La pesquisa se realizó utilizando SCOPUS, limitando los resultados a los últimos 10 años de desarrollo investigativo del tema en cuestión. Scopus es una base de datos bibliográficos de resúmenes y citas de artículos de revistas científicas. Al analizar los resultados de búsqueda con los anteriores filtros aplicados se obtuvieron 111 resultados de documentos, los cuales están clasificados por año y autor y compilados en las figuras 1a y 1b. En estas se puede observar el incremento exponencial de las publicaciones de documentos con el pasar de los años y por ende mayor interés del tema a tratar y también se puede ver el número de documentos escritos por autores.

Figura 1

Documentos encontrados por año y autor



Nota. La figura describe el proceso de revisión documental que se implementa en Scopus.

De los documentos obtenidos como resultado se encuentra el artículo “Reciclaje/reutilización de residuos plásticos como material de construcción para el desarrollo sostenible: una revisión” (Lamba et al., 2022) del año 2022, donde resume los desarrollos con respecto al uso de residuos plásticos como componente del material de construcción, además analiza la inclusión de residuos plásticos como aglutinante, agregado, agregado fino, modificador o sustituto del cemento y la arena en la fabricación de ladrillos, tejas, concreto y caminos. También tienen en cuenta la influencia de la adición de desechos plásticos en las propiedades de resistencia, absorción de agua, y durabilidad.

El artículo “Utilización de residuos plásticos en forma de ladrillos sintéticos” (Aynharan et al. 2023), en el cual busca una forma ecológica para minimizar el impacto ambiental de residuos plásticos, por lo que estos son utilizados para preparar los ladrillos. Para ello, fundieron bloques de ladrillo de mampostería con diferente proporción de dosificación de materias primas tradicionales con plástico. En esta investigación se compara la densidad, la absorción de agua, la resistencia a la compresión y la resistencia a la flexión de una muestra A, una muestra B y el ladrillo convencional disponible localmente.

Otro de los artículos encontrados está “Fabricación de ladrillos con residuos plásticos” (Verma et al., 2022) donde pretenden utilizar el plástico como material de construcción para reemplazar el ladrillo de arcilla. Aquí se presenta un estudio comparativo que realizaron varios autores con ladrillos de mampostería hechos de otros materiales utilizando varios métodos de prueba, como pruebas de rayado, prueba de absorción de agua, pruebas de porosidad, pruebas de solidez, pruebas de rayado, pruebas de eflorescencia, y concluyeron que más investigación en este campo podría mejorar la durabilidad, resistencia y calidad de estos ladrillos de plástico para mampostería. Además, que los ladrillos de plástico son livianos, lo que absorbe muy poca cantidad

de agua o una absorción de agua casi mínima, lo que mejora su propiedad y la resistencia también es mucho mejor que la de los ladrillos de arcilla, casi el doble de un ladrillo de arcilla y que estos pueden soportar dos veces el peso del hormigón del mismo tamaño si se comprimen completamente.

El artículo “La influencia del uso de residuos plásticos de LDPE como árido fino en ladrillos ligeros de hormigón” (Nursyamsi et al., 2019). En este estudio, el uso de arena en los ladrillos se cambia a pellets de plástico LDPE reciclado para ayudar a reducir los problemas ambientales del plástico. Las muestras de mezclas de prueba se trataron durante 7 días y las muestras de ladrillos, cubos y briquetas se trataron durante 28 días antes de la prueba y le hicieron pruebas visuales, de peso de contenido, de absorción, de resistencia a la compresión y de resistencia al arrastre. El análisis de los datos utiliza la referencia SNI 03-0349-1989 sobre ladrillos de hormigón como composición coincidente para muros. En este estudio se utilizó una mezcla de cemento, arena y agua con una relación de 1:6:0.24, esta composición se obtuvo a partir de experimentos en varias composiciones especificadas al igual que la composición del sustituto de los gránulos de plástico utilizados fueron del 20% arena. Desde el aspecto visual, el peso del contenido y la absorción, tanto del ladrillo normal como de los pellets de LDPE al 20% se incluyen en la calidad I, mientras que la prueba de resistencia a la compresión contra la muestra de ladrillo normal dio como resultado la calidad I y el ladrillo de pellets de LDPE al 20% dio como resultado la calidad III.

2.2. Marco teórico

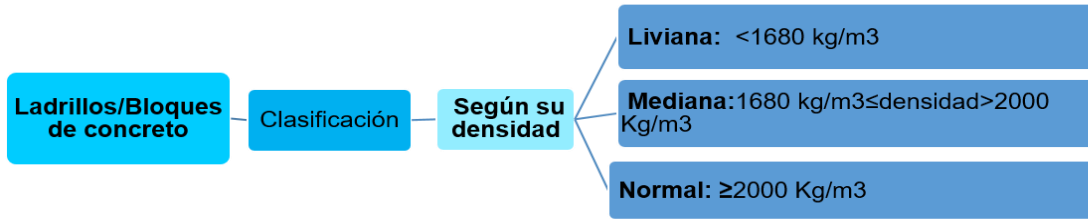
Los materiales de construcción son los productos, subproductos y materias primas empleados en la fabricación de edificaciones y obras civiles (Materiales de construcción,

definición y clasificación, s/f) y hay una gran variedad de ellos. Pueden clasificarse en: materiales naturales, los cuales comprenden materiales pétreos, madera; y en materiales sintéticos que abarcan materiales aglutinantes, compuestos, metálicos, plásticos cerámicos y vidrios (Colombia, 2022). Estos poseen propiedades únicas que les permiten tener determinadas aplicaciones y a diferentes escalas; por lo general, son empleados en la fabricación de edificaciones y obras civiles. Los materiales más usados para construir son el hormigón, acero, madera, arena, piedra, bloques de cemento, ladrillo y/o mezcla (Gerardi, 2021). Siendo el sector de la construcción de constante circulación y de gran auge debido a su crecimiento exponencial con el tiempo resulta fundamental disponer de documentos normativos que rijan, regulen y dispongan de información clara, concisa y sin ambigüedades de esta industria. En Colombia el organismo nacional de normalización, según el Decreto 2269 de 1993 es el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, ICONTEC, el cual instauró la norma técnica colombiana NTC 4026 para bloques y ladrillos de concreto, para mampostería estructural y la NTC 4076 para bloques y ladrillos de concreto, para mampostería no estructural, ambas normas nos brinda información de todo lo relacionado con los bloques de concreto estructural, desde su clasificación, materiales, otros constituyentes, dimensiones, tolerancias, resistencia a la compresión, absorción de agua, absorción de humedad, contracción lineal de secado, acabado, apariencia, muestreo, ensayo y rechazo; siendo esta de gran ayuda para especificar, evaluar y probar los requisitos.

La mampostería no estructural está compuesta por muros no estructurales o también conocidos como muros divisorios ya que solo sirven para dividir espacios y no soportan más carga de su peso propio. La Clasificación según la Norma técnica colombiana NTC 4076 para bloques y ladrillos de concreto, para mampostería no estructural, es según la densidad que estos posean. (ver figura 2).

Figura 2

Clasificación de Ladrillos/Bloques de concreto no estructurales

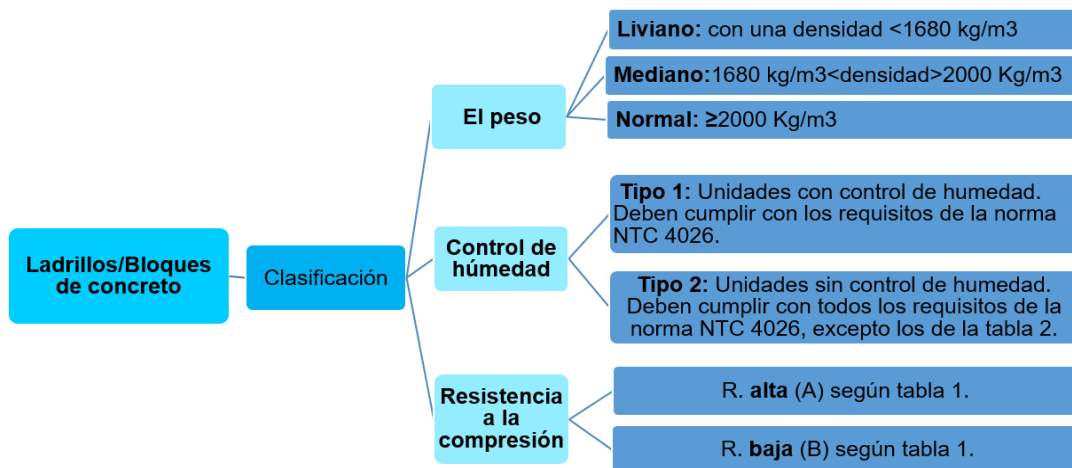


Nota. La figura muestra la clasificación de bloques de concreto no estructurales según la NTC 4076.

La mampostería estructural es un sistema constructivo que hace parte del sistema denominado muros de carga y está compuesto por bloques de concreto u otros materiales que conforman sistemas monolíticos que pueden resistir cargas de gravedad, sismo y viento (MAMPOSTERÍA ESTRUCTURAL: EL QUÉ Y EL CÓMO, 2022). La Clasificación según la Norma Técnica Colombiana NTC 4026 para bloques y ladrillos de concreto, para mampostería estructural, es según el peso, control de humedad y la resistencia a la compresión (ver figura 3).

Figura 3

Clasificación de Ladrillos/Bloques de concreto estructurales



Nota. La figura muestra la clasificación de bloques de concreto estructurales según la NTC 4026.

Tabla 1

Requisitos para la resistencia a la compresión.

Resistencia a la compresión a los 28d (Rc28)B, evaluada sobre el área neta prometida (Anp)		
clase	Promedio de 3 unidades, (mínimo)MPa	Individual
Alta (A)	13	11
Baja (B)	8	7

Nota. La tabla presenta el análisis sobre la resistencia, de acuerdo con los parámetros normativos. Adaptada de Norma Técnica Colombiana Ntc 4026 Y Ntc 4076 para bloques y ladrillos de Concreto, para mampostería estructural y no estructural, (S/F).

Tabla 2

Requisitos para el contenido de humedad tipo 1.

Contracción lineal por secado (cls)a, %	Contenido de humedad (H), promedio de 3 unidades, máximo, como un % del valor total de la absorción de agua (Aa).		
	Condiciones de humedad de la obra o del sitio de uso de las unidades		
	Humedad	Intermedia	Seca
De menos 0,03	45	40	35
De 0,03 hasta menos de 0,045	40	35	30
De 0,045 hasta 0,065 (como máximo)	35	30	25

Nota. La tabla presenta el análisis sobre la humedad, de acuerdo con los parámetros normativos. Adaptada de Norma Técnica Colombiana Ntc 4026 Y Ntc 4076 Para Bloques Y Ladrillos De Concreto, Para Mampostería Estructural Y No Estructural, (S/F).

3. Metodología

Con el fin de llevar a cabo el trabajo de investigación mediante el uso de recursos didácticos se propone el siguiente procedimiento dividido en cuatro fases a ejecutar para alcanzar los objetivos planteados en este proyecto investigativo.

Fase 1: planeación e investigación

Es fundamental ir adquiriendo conocimiento teórico haciendo una revisión bibliográfica minuciosa donde se consulten libros, artículos científicos, páginas web de fuentes confiables que contengan información relevante relacionada con todos los factores que se deben tener en cuenta para el proyecto a realizar a lo largo de todo el semestre. Utilizando la base de datos y recursos disponibles en la Biblioteca de la Universidad Industrial de Santander.

Fase 2: Diseño de procesos de fabricación para el sistema

Con la información obtenida anteriormente se procedió a diseñar el proceso de fabricación de los bloques de materiales compuestos incluyendo las especificaciones generales de los equipos involucrados y un diagrama de flujo general de una planta para la fabricación de los bloques.

Fase 3: Selección de materiales para el bloque de construcción compuesto

En la selección de los materiales para el bloque de construcción compuesto se utilizó como herramienta de trabajo la aplicación Ansys Granta Edupack, el cual es un software interactivo que brinda soporte en la selección gracias a su base de datos de aproximadamente 4181 materiales. En esta fase se clasificaron y seleccionaron plásticos reciclables útiles para la fabricación de ladrillos y se realizó un estudio comparativo de las propiedades de los bloques tradicionales y materiales poliméricos.

Fase 4: elaboración de informe final y sustentación de proyecto

Llevado a cabo todas las fases y subprocesos que estas conllevan y por ende el cumplimiento de los objetivos propuestos para la realización del proyecto de investigación se procede a elaborar el libro final del trabajo de investigación y seguido de esto ser entregado a la escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales con el objeto de ser sometido a evaluación con su respectiva sustentación ante el personal docente y estudiantado.

4. Resultados

Es alarmante la situación de amenaza ambiental que se vive actualmente con la acumulación de plásticos en el medio ambiente, panorama que se puede evidenciar conforme a información estadística que se encuentra a medida que se indaga respecto a la cantidad de residuos sólidos en Colombia, ya que se generaron 11.983.709,70 en términos de toneladas dispuestas anuales en el 2022, según la (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2023). La tasa de generación de residuos es aprox. 0.64 kg/persona/día y aprox. el 14.6 % son plásticos en el flujo de residuos. Aunque América latina abarca sólo aproximadamente el 4% de la producción mundial de plásticos vírgenes, es una cifra que indica que no es un gran productor de plástico a escala mundial, sin embargo, esto muestra indicios de alta probabilidad que la cantidad producida es utilizada en el interior de cada país, teniendo Colombia una producción de 1,746,950 millones de toneladas de residuos plásticos para el año 2020 (Brooks, A., Jambeck, J., & Mozo-Reyes, E. 2020).

La producción e incineración de plásticos contribuye en gran medida al cambio climático. Los residuos plásticos también ahogan las vías fluviales, contaminan los océanos, matan la vida silvestre y se infiltran en la cadena alimentaria. (The Nature Conservancy, 2020). La finalidad de incluir el plástico reciclado para la elaboración de bloques de construcción está en la posibilidad de utilizar como beneficio ambiental el reciclaje, la reducción, y reutilización de residuos plásticos. Además de darle mayor vida útil ya que es un material de descomposición lenta que puede tardar decenas de años en degradarse. Este proyecto se puede considerar como una nueva alternativa de reciclaje y también de proporcionarle un valor económico a los residuos plásticos.

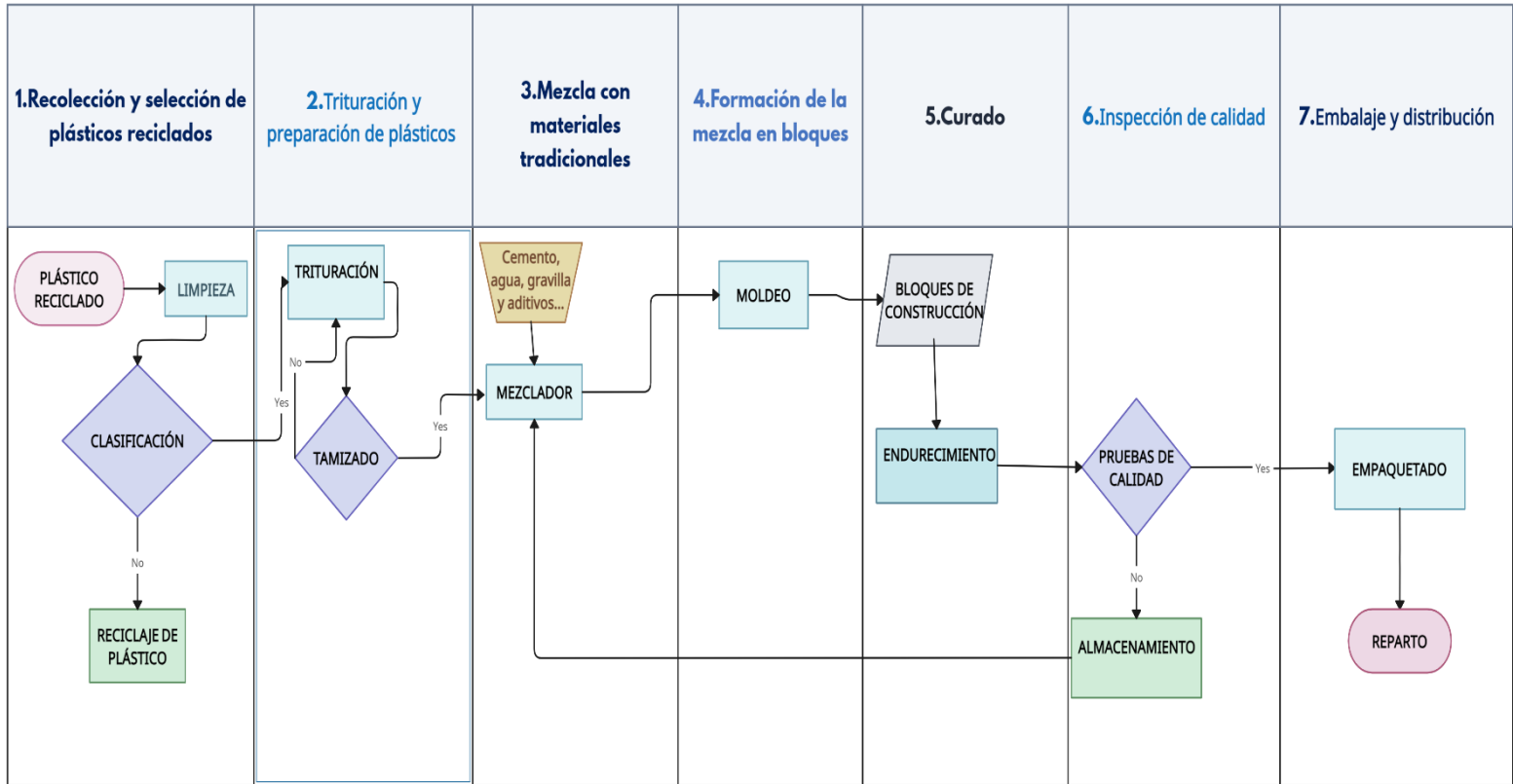
Diseño de un sistema para la fabricación de bloques a partir de plásticos reciclados

El funcionamiento de una planta para la fabricación de bloques de construcción dependerá del diseño de esta teniendo en cuenta factores tales como, la capacidad de producción, el tipo de bloques y de materiales a usar para la fabricación, presupuesto disponible, modelo de equipos, y el tipo de sistema a utilizar ya sea manual o automático, entre otros factores. A continuación, se presenta un diagrama de flujo generalizado con las diferentes etapas y medidas de control de calidad del proceso (ver figura 4). Este proceso comienza con la recolección de plásticos reciclados tales como botellas, envases provenientes de diferentes fuentes, entre otros; estos pasan por una limpieza con el objeto de eliminar impurezas, para luego ser clasificados y seleccionados de acuerdo al tipo de plástico escogido según su composición para la fabricación de bloques compuestos. se procede con la fase de trituración con el fin de disminuir el tamaño de partícula de los plásticos reciclados y estos son pasados por un proceso de tamizado con una granulometría específica adecuada para la aplicación, el producto que no cumpla con el tamaño de partícula determinado se retorna a la trituradora y el producto plástico que si cumple con esta granulometría pasa a un mezclador que además de contener el plástico ya triturado se le agregan materiales tradicionales tales como el cemento, agua, arena, grava, que sirven para reducir la cantidad de cemento necesario, también para lograr las características y la consistencia deseada del bloque; además otros aditivos y modificadores, tales como agentes plastificantes que pueden mejorar la trabajabilidad y reducir la cantidad de agua necesaria en la mezcla., estabilizadores UV para proteger el plástico reciclado de la degradación causada por la exposición a la luz solar. Puede agregarse material de refuerzo, como fibras de vidrio, para mejorar la resistencia a la tracción y la tenacidad. La proporción de cada material dependerá de las especificaciones y la validaciónn de

la fórmula mediante pruebas de laboratorio. esta fase de materiales y otros agregados es fundamental ya que determina las propiedades tales como la adherencia, manejabilidad de la mezcla, resistencia a la intemperie y por ende la calidad del producto final; la mezcla preparada se introduce en moldes con forma y dimensiones específicas para los bloques, para luego ser compactada y prensada con el fin de obtener bloques sólidos que son llevados a un área de curado con condiciones controladas de humedad y temperatura para ser endurecidos y por ende cobrar resistencia; los bloques pasan por una inspección de calidad basada en pruebas de resistencia mecánica para garantizar que se cumplan con las especificaciones y estándares requeridos como son las normas técnicas colombianas NTC 4026, la 4076 y la 4205. los bloques que no pasen estas pruebas son llevados a un lugar de almacenamiento para después ser introducidos al mezclador nuevamente con el objeto de reciclar los materiales usados previamente; una vez los bloques han pasado la inspección de calidad, se embalan y se preparan para ser transportados y distribuidos. A lo largo del desarrollo del diagrama ha sido importante implementar medidas de control de calidad en cada etapa del proceso con el objeto de garantizar la calidad del producto final, aunque cabe resaltar que la eficiencia y la sostenibilidad del proceso se puede mejorar mediante prácticas adicionales como la gestión eficiente de los residuos procesados, la optimización de la energía utilizada, y el uso de tecnologías más avanzadas que impliquen una mayor inversión económica.

Figura 4

Diagrama de flujo de una planta para la fabricación de bloques de construcción con plástico reciclado.



Propiedades mecánicas de bloques y ladrillos convencionales

Los ladrillos y bloques tradicionales de construcción para edificaciones deben cumplir con propiedades específicas. Algunas de las propiedades mecánicas de los ladrillos de arcilla común con usos típicos en estructuras de ingeniería civil tales como edificios, puentes, represas, y carreteras, son el módulo de Young entre 10 - 50 GPa, la dureza en Vickers * 28 - 31 HV. Y para los ladrillos de ingeniería con usos típicos en construcción de ingeniería, pavimentación exterior y ladrillos de revestimiento para paredes, el módulo de Young esta entre 30 – 35 GPa y la dureza en Vickers 15- 45 HV. Ahora para los bloques tradicionales hechos a base de hormigón el cual es

una mezcla de agua, arena, cemento y piedras o gravas se tienen que las propiedades aquí indicadas corresponden para hormigón ligero no armado, teniendo en cuenta eso el módulo de Young esta entre 11 – 21 GPa, su módulo a granel está entre * 5.8 – 11.1 GPa y la dureza en Vickers *5.1 – 5.6 HV. La resistencia mecánica es fundamental ya que los ladrillos o bloques deber ser capaces de soportar las diferentes cargas estructurales que actúan sobre ellos, en el caso del ladrillo de arcilla con una densidad de $1.98e3 - 2,07e3 \text{ kg/m}^3$, tiene una resistencia a la tracción de * 6.9 - 14 MPa, una resistencia a la compresión entre * 69 - 140 MPa, resistencia a la flexión o módulo de rotura de * 8.3 - 16.8 MPa, y resistencia a la fatiga a 10^7 ciclos * 7.96 - 9.29 MPa. Ahora, las propiedades mecánicas para los ladrillos con designación de ingeniería y densidad de $2.1e3 - 2.5e3 \text{ kg/m}^3$, tiene una resistencia a la tracción de 5 – 15 MPa, una resistencia a la compresión entre *45 - 150 MPa, resistencia a la flexión o módulo de rotura de 5 – 15 MPa, y resistencia a la fatiga a 10^7 ciclos de *2 - 6 MPa. El hormigón con una densidad de $1.4e3 - 2e3 \text{ kg/m}^3$, tiene una resistencia a la tracción de *1.1 - 2.8 MPa, una resistencia a la compresión entre *11.3 - 28 MPa, resistencia a la flexión de 3 – 17 MPa, y resistencia a la fatiga a 10^7 ciclos de *0.79 – 1.23 MPa. El peso tiene que ser manejable y compatible con la estructura de la edificación. Dentro de las propiedades físicas de los ladrillos está la porosidad y absorción de agua que son cruciales para evitar problemas de humedad y deterioro, para el ladrillo común la porosidad cerrada esta entre *0 – 0.01% y la porosidad abierta *0.06 – 0.2 % y para el ladrillo ingenieril tiene una absorción de agua a las 24 horas en un rango de 0.1 – 0.4 %, una absorción de agua @ sat de *0.5 – 2 %, y absorción de humedad @ sat de 0.167 – 0.667 %.

La durabilidad, es uno de los requisitos primordiales debido a que tiene que aguantar los diferentes factores ambientales sin perder sus propiedades estructurales a lo largo del tiempo, el

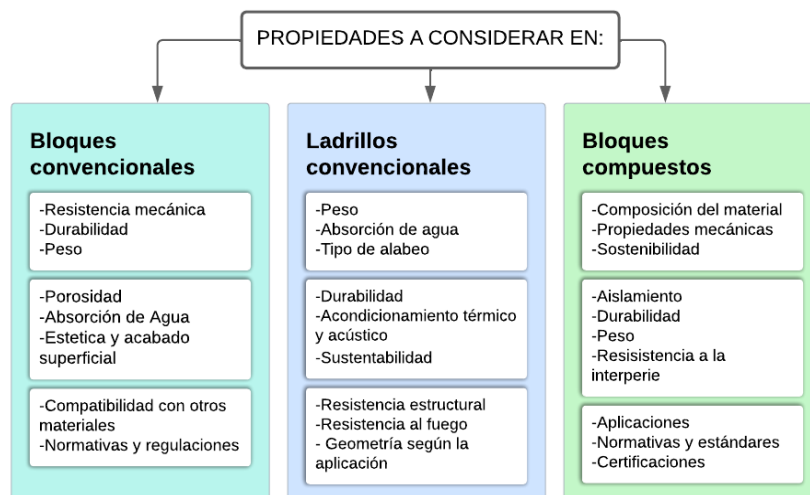
ladrillo común y el ladrillo de ingeniería en ambientes de agua dulce, agua salada, y la radiación UV (luz solar) tienen un desempeño excelente mientras que el hormigón en agua dulce y radiación UV es excelente, pero para agua de sal su durabilidad es aceptable. Dentro de las propiedades de impacto y fractura del ladrillo común tenemos la resistencia a la fractura en un rango de 1 - 2 MPa.m^{0.5} y la resistencia (G) 0.0359 - 0.223 kJ/m² para el ladrillo ingenieril la resistencia a la fractura de 0.00143 - 0.015 MPa.m^{0.5} y la resistencia (G) 1.21e-7 – 3.62e-6 kJ/m² y para el hormigón la resistencia a la fractura *0.04 – 0.07 MPa.m^{0.5}. También es necesaria la compatibilidad entre materiales utilizados para garantizar una unión efectiva entre ellos, para el ladrillo común debe haber uniformidad en sus composiciones de Al₂O₃(alúmina) entre el 40 - 70%, el Fe₂O₃(óxido férrico) 1-3%, la SiO₂(sílice) 30 – 52% y otros componentes 1-3%, mientras que para el ladrillo de ingeniería su composición es de Al₂O₃(alúmina) 58 - 78%, el Fe₂O₃(óxido férrico) 1-3%, la SiO₂(sílice) 23 – 33% y otros componentes 1-3%. Los componentes del hormigón son agua, arena, grava o piedra y cemento, las proporciones de la mezcla varían para producir propiedades muy diversas.

En cuanto a información de la producción primaria y el procesamiento de energía, de CO₂ y agua se tiene que, para ambos tipos de ladrillo son los mismos valores de: la energía incorporada en producción primaria de grado virgen y grado típico está en un rango de 2.86 – 3.15 MJ/kg, la huella de CO₂ en la producción primaria tanto de grado virgen como de grado típico es de 0.229 – 0.252 kg/kg, y el consumo de agua *5.27 – 5.83 l/kg. Ahora los valores variantes corresponden a la energía de molienda por unidad de peso eliminado *9.7 - 10.7 MJ/kg, el CO₂ de molienda por unidad de peso eliminado está entre *0.727 – 0.804 kg/kg para el ladrillo de arcilla común y para el ladrillo ingenieril la energía de molienda por unidad de peso eliminado es de *7.29 - 8.05 MJ/kg, y el CO₂ de molienda por unidad de peso eliminado está entre *0.547 – 0.604 kg/kg. El hormigón

tiene una energía incorporada en la producción primaria de* 0.779 – 0.859 MJ/kg, una huella de CO₂ en la producción primaria entre *0.116 – 0.128 kg/kg, un consumo de agua de * 14.3 – 15.8 l/kg, la energía de molienda por unidad de peso eliminado es de *2.49 – 2.76 MJ/kg y el CO₂ de molienda por unidad de peso eliminado *0.187 – 0.207 kg/kg. Con lo que respecta a reciclado y fin de vida útil tanto del ladrillo común como el ingenieril se encuentra que no se recicla y termina en vertederos, mientras que el hormigón si se recicla y tiene una energía incorporada en el reciclaje de *0.758 – 0.838, una huella de CO₂ en el reciclaje de *0.0631 – 0.0698 kg/kg y una fracción de reciclado en el suministro actual de 13 – 14.4 %. La apariencia estética y el acabado superficial son aspectos importantes, pero aún más las normativas y regulaciones nacionales que deben cumplir los ladrillos y bloques de construcción, como por ejemplo las normas técnicas colombianas NTC 4026, la 4076 y la 4205. Cabe destacar que todos los valores en cuanto información de propiedades fueron obtenidos de Ansys Granta Edupack con nombre de Ansys: ladrillo común, ladrillo ingenieril y hormigón (estructural ligero). Los valores marcados con * son aproximaciones ANSYS, Inc.

Figura 5

Diagrama comparativo de propiedades de los bloques.



Clasificación y selección de plásticos reciclables útiles para la fabricación de ladrillos

Considerando uno de los objetivos específicos del proyecto donde se pretende clasificar y seleccionar plásticos reciclables útiles para la fabricación de ladrillos, con el objeto de llevarlo a cabo se realiza la clasificación por números. Ahora bien, la mayoría de los tipos de plástico de uso comercial son reciclables, pero es fundamental identificarlos y diferenciarlos para su aprovechamiento. Los plásticos están marcados con el signo de reciclado que corresponde a un triángulo formado por flechas y en su interior lleva un número del 1 al 7 para los diferentes tipos de plástico y están asignados de la siguiente manera: 1- PET (Tereftalato de Polietileno), 2- HDPE (Polietileno de alta densidad), 3- PVC (Polivinilo), 4- LDPE (Polietileno de baja densidad), 5- PP (Polipropileno), 6- PS (Poliestireno), 7- otros plásticos y materiales compuestos (Tipos de Plástico, s/f). El Minambiente expidió la Resolución No. 2184 de 2019, mediante la cual estableció, el código de colores blanco, negro y verde para la separación de residuos en la fuente, de la siguiente manera, color blanco: Para depositar los residuos aprovechables como plástico, vidrio, metales, papel y cartón. Color negro: Para depositar residuos no aprovechables como el papel higiénico; servilletas, papeles y cartones contaminados con comida; papeles metalizados; residuos COVID-19 como tapabocas, guantes, entre otros. Color verde: Para depositar residuos orgánicos aprovechables como los restos de comida, desechos agrícolas como residuos de corte de césped y poda de jardín, etc. (De Prensa, s. f.).

Los tipos con una reciclabilidad más alta son el PET o PETE (1, Polietileno Tereftalato), HDPE (2, Polietileno de Alta Densidad), y el polipropileno (5, PP). El proceso de reciclaje de estos plásticos es mucho más sencillo en vertederos y plantas especializadas, por lo que puede

reaprovecharse gran parte del material. Estos tipos de plásticos son los que se utilizan con más frecuencia en otros plásticos reciclados («Tipos de Plásticos: Clasificación y Reciclaje», 2023). Teniendo en cuenta que el PET es una de los tipos de plásticos más fáciles de reciclar se procede a ver sus propiedades (**ver tabla 3**).

Tabla 3

Cuadro comparativo de 2 tipos de PET en cuanto a Propiedades físicas, mecánicas, térmicas, permeabilidad, procesamiento, durabilidad; la energía, el CO2 y consumo de agua en la producción primaria, el procesamiento y reciclaje.

Nombre	Tereftalato de polietileno (sin relleno, amorfo). Código de polímero: PET (CO-(C ₆ H ₄)-CO-O-(CH ₂) ₂ -O) _n	Tereftalato de polietileno (sin relleno, semicristalino). Código de polímero: PET (CO-(C ₆ H ₄)-CO-O-(CH ₂) ₂ -O) _n
Familia	Plástico (termoplástico, amorfo)	Plástico (termoplástico, semicristalino)
Composición	100% polímero	100% polímero
Usos típicos	Botellas moldeadas por soplado, películas para embalaje, películas fotográficas y de rayos X, cintas audiovisuales, flejes industriales, películas para condensadores, transparencias para oficina de dibujo, fibras.	Accesorios y conectores eléctricos, enchufes y tomas de corriente, cintas audiovisuales, flejes industriales, películas para condensadores, fibras.
Densidad	1.29e3 - 1.39e3 kg/m ³	1.37e3 - 1.4e3 kg/m ³
Módulo de Young	*2.8 – 3 GPa	2.76 – 3.1 GPa
Resistencia a la tracción	55 – 60 MPa	70 – 75 MPa
Resistencia específica	*36.9 – 41.6 kN.m/kg	*46.9 – 50.6 kN.m/kg
Módulo de compresión	* 2.76 – 4.14 GPa	*2.76 – 4.14 GPa
Módulo de flexión	2.41 – 3.09 GPa	2.99 – 3.09 GPa
Resistencia a la flexión o módulo de rotura	50 – 60 MPa	* 70 – 75 MPa
Dureza en Vickers	*2 - 5HV	*17 – 20 HV
Resistencia a la fatiga a 10⁷ ciclos	*19.3 - 29 MPa	*19.3 - 29 MPa
Tenacidad a la fractura	*4.75 – 5.25 MPa.m ^{0.5}	*4.75 – 5.25 MPa.m ^{0.5}

Dureza (G)	*7.76 – 9.54 kJ/m ²	*7.62 – 9.54 kJ/m ²
Punto de fusión	237 – 277°C	255 – 265 °C
Temperatura mínima y máxima de servicio	*(-58) – (-38) °C, *55 – 65 °C	*(-58) – (-38) °C, * 115 – 120 °C
Absorción de agua a las 24 horas de	0,14 – 0.18 %	0.1 – 0.2 %
Permeabilidad (O₂)	1.2 – 2.77 cm ³ .mm/m ² .dia.atm.	1.2 – 2.77 cm ³ .mm/m ² .dia.atm.
Moldeo por inyección y extrusión de polímeros	Aceptable y uso limitado	Aceptable y uso limitado
Termoformado	Aceptable	Aceptable
Durabilidad en agua fresca y de sal	Excelente	Excelente
Durabilidad en radiación ultravioleta (luz solar)	Justo	Justo
Energía incorporada en producción primaria de grado virgen y de grado típico	78.6 – 86.7 MJ/kg, *68.7 – 76.8 MJ/kg	78.6 – 86.7 MJ/kg, *68.7 – 76.8 MJ/kg
Huella de CO₂ en producción primaria de grado virgen y de grado típico	2.8 – 3.08 kg/kg, *2.54 – 2.82 kg/kg	2.8 – 3.08 kg/kg, *2.54 – 2.82 kg/kg
Consumo de agua	*126 – 140 l/kg	*126 – 140 l/kg
Energía, CO₂ y agua gastada en la extrusión de polímeros	*5.82 – 6.43 MJ/kg *0.437 – 0.483 kg/kg *4.83 – 7.24 l/kg	*5.8 – 6.42 MJ/kg *0.435 – 0.481 kg/kg *4.82 – 7.23 l/kg
Energía, CO₂ y agua gastada en el moldeo de polímeros	*18.7 – 20.6 MJ/kg *1.4 – 1.55 kg/kg *12.6 – 18.9 l/kg	*18.2 – 20.1 MJ/kg *1.36 – 1.51 kg/kg *12.4 – 18.6 l/kg
Energía y CO₂ de molienda por unidad de peso eliminado	*8.25 – 9.11 MJ/kg *0.618 – 0.684 kg/kg	* 12.6 – 13.9 MJ/kg * 0.945 – 1.04 kg/kg
Reciclaje y fin de vida útil	Es un material que, si se puede reciclar, no es biodegradable y fácilmente terminan objetos hechos de PET en vertederos.	
Energía, huella de CO₂ en el reciclaje y el CO₂ de combustión	*26.8 – 29.6 MJ/kg *1.45 – 1.6 kg/kg *2.24 – 2.35 kg/kg	*26.8 – 29.6 MJ/kg *1.45 – 1.6 kg/kg *2.24 – 2.35 kg/kg
Fracción de reciclaje en el suministro actual	17.3 – 19.1 %	17.3 – 19.1 %

Nota. La tabla contiene información de propiedades físicas, mecánicas, térmicas,

de procesamiento y durabilidad, entre otras. Propiedades obtenidas de Ansys Granta Edupack con

Nombre de Ansys: Plástico, PET (amorfo) y PET (semicristalino). Los valores marcados con *

son aproximaciones ANSYS, Inc.

En la necesidad por abordar los problemas de residuos plásticos y fomentar la sostenibilidad en la construcción, algunas entidades del sector han elaborado ladrillos plásticos como la empresa EasyBrick de Buenos Aires, Argentina con un proceso de construcción 100% sustentable ya que la materia prima de los ladrillos elaborados es con polipropileno (PP) reciclado de su propia planta de reciclaje. Algunas de las características técnicas de los ladrillos es que tienen un bajo peso y alto comportamiento estructural. Esto los hace ideales para obras rápidas. Además, reduce costos de flete, manipuleo en obra. EasyBrick es fabricado con PP reciclado. No se utiliza materia prima virgen en el proceso productivo. La fabricación del ladrillo es por medio de inyección, como resultado de este proceso se logra que el producto adquiera estabilidad dimensional. La vida útil del Polipropileno se estima en 100 años. El sistema de encastre entre bloques es simple y garantiza que la construcción de las hiladas del muro, posean una escuadra y plomo perfectos. El sistema EasyBrick es muy versátil, adaptable a proyectos de construcción seca y combinable con construcción tradicional. Aplicable a industrias, viviendas, ampliaciones, reformas, etc. Por su naturaleza plástica, el porcentaje de absorción de agua de los ladrillos es 0%. El PP tiene baja conductividad térmica, esta propiedad se ve potenciada por las 3 cámaras de aire que conforman el diseño del bloque. Los bloques tienen 3 cámaras de aire que conforman un espectro acústico superior al de otros sistemas (EasyBrick, s. f.-b).

Siendo el Polipropileno una opción dentro de la variedad de plásticos como materia prima para elaborar ladrillos plásticos es importante analizar las propiedades de este material. Utilizando la base de datos de la herramienta especializada en materiales Ansys Granta Edupack para el polipropileno sin otros compuestos se encuentran 12 tipos, los cuales son, homopolímero: clarificado/nucleado, HB retardado por llama, V-O retardado por llama, de alto flujo, bajo flujo;

copolímero de impacto: retardo por llama, de alto flujo, de bajo flujo, estabilizado a los ratos UV;
copolímero aleatorio: clarificado/nucleado, de alto flujo y bajo flujo. Se han seleccionado 4 tipos para ver a detalle sus propiedades de acuerdo a los usos típicos de cada tipo de polipropileno (PP) enfocados en el uso común de objetos plásticos que fácilmente terminan en la basura, en vertederos o en puntos de reciclaje (**ver tabla 4**).

Tabla 4

Cuadro comparativo de 4 tipos de Polipropileno (PP) en cuanto a Propiedades físicas, térmicas, permeabilidad, procesamiento, durabilidad; la energía, el CO2 y consumo de agua en la producción primaria, el procesamiento y reciclaje.

Nombre	PP (homopolímero, clarificado/nucleado, $(\text{CH}_2\text{-CH}(\text{CH}_3))_n$ – isotáctico). Código de polímero: PP	PP (homopolímero, retardante de llama HB). Código de polímero: PP-FR	PP (copolímero de impacto, retardante de llama). Código de polímero: PP-I-FR.	PP (copolímero aleatorio, clarificado/nucleado) Código de polímero: PP
Referencia	las resinas de PP clarificadas están "nucleadas", lo que significa que se ha mezclado con la resina un aditivo de nucleación de cristales, estos aditivos aclaran el material aumentando el número y reduciendo el tamaño de los cristalitos en el material.	$(\text{CH}_2\text{-CH}(\text{CH}_3))_n$ - isotáctico + aditivos retardantes de llama.	Copolímero en bloque de homopolímero de PP y 5-25% en peso de caucho de copolímero de etileno-propileno (EPR o E/P). Forma un material de dos fases (heterofase) con EPR finamente disperso en la fase continua de PP.	Copolímero aleatorio de propileno $(\text{CH}_2\text{CH}(\text{CH}_3))_n$ pequeñas cantidades de etileno $(\text{CH}_2\text{CH}_2)_m$ u otro comonómero, formando un material monofásico. Contenido de etileno de hasta el 7%, pero normalmente del 2 al 4%.
Familia	Materiales plásticos (termoplásticos, semicristalino)			
Composición	100% polímero	-Polímero: 85 – 95% -Retardante de llama: 5 – 15%	-Polímero: 70 – 85% -Retardante de llama: 5 – 10% -Modificador de impacto: 10 – 20%	100% polímero
Usos típicos	Artículos para el hogar, piezas, embalajes, cajas de batería, cosméticos, artículos hospitalarios, material de laboratorio suministros de papelería, contenedores, tambores de lavadoras,	Perfiles, láminas, flejes, contenedores, tapas, juguetes, respaldo de alfombras, cuerdas, cordeles, monofilamentos, cintas, componentes	Repuestos industriales, baterías, asientos, artículos deportivos, electrodomésticos, equipaje, cajas de herramientas/bolsas, aplicaciones eléctricas/electrónicas,	Botellas, jugos de frutas, cosméticos, vasos desechables, embalajes cosméticos, embalajes productos farmacéuticos, cintas de audio, cubos, cuencos, piezas mecánicas en

	aplicaciones automotrices, artículos hospitalarios, compuestos, cosméticos, muebles para exteriores, bandejas aptas para microondas, respaldo de alfombra, entre muchos otros usos.	de electrodomésticos, aplicaciones de moldeo por soplado, accesorios, uso general, tuberías, varillas, piezas de bombas, tanques, industriales, válvulas, entre muchos otros usos.	cierres, muebles, juguetes, suministros de papelería, hogar productos, válvulas/piezas de válvula, piezas exteriores de automóviles, entre muchos otros usos.	general, cajas de botellas, tapas, equipos de césped y jardín, aplicaciones agrícolas, lavadoras, parachoques, películas para embalaje, fibras para alfombras y superficies deportivas artificiales, entre otros muchos usos.
Densidad	900 a 909 kg/m ³	898 a 911 kg/m ³	896 a 905 kg/m ³	897 a 906 kg/m ³
Módulo de Young	1.6 – 1.78 GPa	1.27 – 1.6 GPa	1.02 – 1.04 GPa	1.18 – 1.41 GPa
Resistencia a la tracción	36.2 – 49 MPa	35 – 36 MPa	29 – 33 MPa	*26 – 50 MPa
Resistencia específica	*39.1 – 42.1 kN.m/kg	*34.3 – 38.3 kN.m/kg	*29.4 – 30 kN.m/kg	*27.2 – 33.2 kN.m/kg
Esfuerzo – deformación plástica	12.9 MPa, parámetro de deformación = 0.1% a una T= 23°C	12.9 MPa, parámetro de deformación = 0.1% a una T= 23°C	-----	-----
Módulo de compresión	*1.6 – 1.78 GPa	*1.27 – 1.6 GPa	*1.02 – 1.04 GPa	*1.18 – 1.41 GPa
Módulo de flexión	1.55 – 1.8 GPa	1.4 – 1.62 GPa	0.9 – 1.08 GPa	1.12 – 1.36 GPa
Resistencia a la flexión o módulo de rotura	*32.1 – 55.5 MPa	*45 – 50.2 MPa	*38.4 – 39.1 MPa	*31.3 – 35.9 MPa
Dureza en Vickers	11 HV	11 HV	7 HV	8 HV
Resistencia a la fatiga a 10⁷ ciclos	*16.4 – 17.3 MPa	*14 – 14.4 MPa	*11.6 – 13.2 MPa	*7.45 – 7.82 MPa
Tenacidad a la fractura	*2.3 – 2.42 MPa.m ^{0.5}	*2.12–2.57MPa.m ^{0.5}	*1.84 –2.22 MPa.m ^{0.5}	*1.26 –1.33 MPa.m ^{0.5}
Dureza (G)	*3.07 – 3.54 kJ/m ²	*3.08 – 4.72 kJ/m ²	*3.31 – 4.75 kJ/m ²	*1.17 – 1.44 kJ/m ²
Punto de fusión	160 – 169°C	162 – 171°C	147- 155 °C	151 – 167 °C
Temperatura mínima y máxima de servicio	*(-17) – (-3) °C, *87.2 – 99.1 °C	*(-17) – (-3) °C, * 102 – 121 °C	*(-26) – (-11) °C, *96.1 – 115°C	*(-25) – (-10) °C, * 69.4 – 86.8 °C
Absorción de agua a las 24 horas de	0.00975 - 0.0103 %	0,00789 - 0,0139%	0,00908 - 0,0142%	0.0195 - 0,0205%

Permeabilidad (O2)	58.3-99.7 cm ³ .mm/m ² .dia.atm.	58.3-99.7 cm ³ .mm/m ² .dia.atm.	61.2-144 cm ³ .mm/m ² .dia.atm.	61.2-144 cm ³ .mm/m ² .dia.atm.
Moldeo por inyección y extrusión de polímeros	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
Termoformado	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable
Durabilidad en agua fresca y de sal	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
Durabilidad en radiación ultravioleta (luz solar)	Pobre	Pobre	Pobre	Pobre
Energía incorporada en producción primaria de grado virgen y de grado típico	68.5 – 75.5 MJ/kg, *67.3 – 74.3 MJ/kg	*74.1 – 81.7 MJ/kg, *72.8 – 80.4 MJ/kg	*74.9 – 82.6 MJ/kg, *73.5 – 81.2 MJ/kg	*65.9 – 72.6 MJ/kg, *64.6 – 71.4 MJ/kg
Huella de CO2 en producción primaria de grado virgen y de grado típico	1.87 – 2.06 kg/kg, *1.85 - 2.04 kg/kg	*2.44 – 2.69 kg/kg, *2.41 – 2.66 kg/kg	*3.22 – 3.56 kg/kg, *3.16 – 3.5 kg/kg	*2.77 – 3.06 kg/kg, *2.72 – 3.01 kg/kg
Consumo de agua	*37.3 – 41.2 l/kg	* 37.3 – 41.2 l/kg	*33.5 – 37 l/kg	*37.2 - 41.2 l/kg
Energía, CO2 y agua gastada en la extrusión de polímeros	*5.95 – 6.58 MJ/kg *0.446 – 0.493 kg/kg *4.88 – 7.32 l/kg	* 5.92 – 6.55 MJ/kg * 0.444 – 0.491 kg/kg * 4.87 – 7.3 l/kg	* 5.92 – 6.54 MJ/kg *0.444 – 0.491 kg/kg * 4.87 – 7.3 l/kg	* 5.94 – 6.56 MJ/kg *0.445 – 0.492 kg/kg * 4.88 – 7.31 l/kg
Energía, CO2 y agua gastada en el moldeo de polímeros	*22.3 – 24.6 MJ/kg *1.67 – 1.85 kg/kg * 14.1 – 21.1 l/kg	* 21.5 – 23.7 MJ/kg * 1.61 – 1.78 kg/kg * 13.8 – 20.6 l/kg	* 21.4 – 23.7 MJ/kg * 1.61 – 1.77 kg/kg * 13.7 – 20.6 l/kg	*21.9 – 24.3 MJ/kg * 1.65 – 1.82 kg/kg * 14 – 20.9 l/kg
Energía y CO2 de molienda por unidad de peso eliminado	*9.71 – 10.7 MJ/kg *0.729 – 0.805 kg/kg	*9.72 – 10.7 MJ/kg * 0.729 – 0.806 kg/kg	* 8.47 – 9.36 MJ/kg * 0.635 – 0.702 kg/kg	*7.34 – 8.12 MJ/kg *0.551 – 0.609 kg/kg
Reciclaje y fin de vida útil	Es un material que, si se puede reciclar, no es biodegradable y fácilmente terminan objetos hechos de PP en vertederos.			
Energía, huella de CO2 en el reciclaje y el CO2 de combustión	*24.6 – 27.2 MJ/kg *1.06 – 1.17 kg/kg *3.06 – 3.22 kg/kg	* 26.5 – 29.2 MJ/kg * 1.23 – 1.36 kg/kg * 2.53 – 2.66 kg/kg	*25.5 – 28.2 MJ/kg * 1.13 – 1.25 kg/kg * 2.53 – 2.66 kg/kg	* 22.3 – 24.7 MJ/kg * 0.94 – 1.04 kg/kg * 3.06 – 3.22 kg/kg
Fracción de reciclaje en el suministro actual	2.57 – 2.84%	2.57 – 2.84%	2.57 – 2.84 %	2.57 – 2.84 %

Nota. La tabla contiene información de propiedades físicas, mecánicas, térmicas, de procesamiento y durabilidad, entre otras. Propiedades obtenidas de Ansys Granta Edupack con Nombre de Ansys: Plástico, PP (homopolímero, clarificado/nucleado), PP (homopolímero, retardante de llama HB), PP (copolímero de impacto, retardante de llama), PP (copolímero aleatorio, clarificado/nucleado). Los valores marcados con * son aproximaciones ANSYS, Inc.

Para asegurar la integridad estructural de cualquier edificación fabricada con los bloques compuestos, deben ser importantes algunas de las características generales que son: la resistencia mecánica puesto que debe resistir las cargas verticales, horizontales, de compresión, tensión y flexión a los que estará sometido; la durabilidad puesto que deben resistir a la intemperie y la vida útil a largo plazo; El peso de los bloques influye en la facilidad de manipulación durante la construcción; la porosidad y absorción de agua son propiedades muy importantes para prevenir daños causados por la humedad; es fundamental al fabricar bloques de construcción con esta mezcla de materiales cumplir las normativas y estándares de la NTC (Normas Técnicas Colombianas) Además, algunas certificaciones pueden validar la sostenibilidad del producto.

Métodos para estimar algunas propiedades de los ladrillos compuestos

Anteriormente se han mencionado las propiedades del hormigón el cual es la base de los bloques de cemento convencionales, los ladrillos de arcilla común, los ladrillos ingenieriles, las propiedades del PET por su facilidad de reciclaje y también de 4 tipos de PP, material del cual están hechos los ladrillos plásticos de una empresa que fabrica y distribuye este tipo de modelo sustentable. Con el objetivo de crear un modelo de ladrillos compuestos a base de hormigón y de

plástico PET y PP, considerando las propiedades individuales de los materiales de la mezcla es necesario calcular la proporción adecuada de cada componente ya que de esto depende las propiedades mecánicas deseadas y óptimas para los ladrillos. Para esto se van a tener en cuenta ciertos factores, partiendo de que ya se tienen las propiedades individuales de los materiales a utilizar entonces se procederá a identificar las propiedades a considerar en los ladrillos compuestos, las cuales son densidad, resistencia a la compresión, resistencia a la tracción, resistencia a la flexión y durabilidad. Se procede a calcular las propiedades mecánicas del bloque compuesto a base de plástico y hormigón a partir de las propiedades mecánicas de los componentes individuales y la proporción de la mezcla. Para esto se pueden utilizar varios métodos como la regla de las mezclas, el modelo de Mori-Tanaka, el modelo de Halpin-Tsai y Análisis de elementos finitos (FEA). Es muy importante tener claro que un compuesto es un material estructural que consta de dos o más constituyentes combinados que se combinan a nivel macroscópico y no son solubles entre sí. Un componente se denomina fase de refuerzo y aquel en el que está incrustado se denomina matriz. El material de la fase de refuerzo puede estar en forma de fibras, partículas o escamas. Los materiales de la fase matricial son generalmente continuos (Kaw, 2006). En este proyecto el refuerzo es el plástico de Polipropileno (PP) y el tereftalato de polietileno (PET) en una matriz de hormigón.

En el caso de la regla de las mezclas es un método sencillo, pero resulta útil para estimar las propiedades de un material compuesto a partir de las propiedades de sus componentes individuales y sus fracciones volumétricas. Para este método, se consideran las propiedades mecánicas individuales de la matriz y el refuerzo, como la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión y tracción, datos mencionados anteriormente en el texto y en las tablas 3 y 4. A continuación, vamos a necesario definir la fracción volumétrica de los componentes de la

mezcla, minimizando el uso del hormigón agregándole plásticos manteniendo aun así las propiedades óptimas de servicio. Para esto se asignaron valores hasta encontrar un equilibrio entre las propiedades y la cantidad máxima de plástico que se pueda usar, y de esa forma se determinó una proporción inicial de 30% hormigón y 70% plástico, siendo mitad de PET y mitad de PP, y sus respectivas fracciones volumétricas son 0.3 y 0.7. Cabe resaltar que los diferentes tipos de plásticos y sus respectivos valores de propiedades mencionados en el texto y en las tablas 3 y 4 se presentan en rangos y en el material reciclado se pueden considerar que se encuentran de manera aleatoria estos diferentes tipos de pet y de polipropileno, por lo que han sido agrupados en las tablas 5, 6 y 7 para simplificar y de esta forma realizar el cálculo de la media de datos agrupados mediante el uso de una calculadora digital de medidas de tendencia central, al cual se puede acceder con el siguiente enlace: [Calculadora de medidas de tendencia central - Media Mediana y Moda \(calculadorasonline.com\)](http://Calculadora de medidas de tendencia central - Media Mediana y Moda (calculadorasonline.com)). Considerando la mezcla a partir de las fracciones volumétricas establecidas anteriormente se calcula la fracción en peso usando 1m³ como volumen total y la media de los rangos de densidades para el PET de 27.12 kg/m³, el PP de 902.92 kg/m³ y del hormigón de 34.15 kg/m³, obteniendo porcentajes máxicos de 2.83% para el PET, 94,12% de PP y 3.05% para el hormigón. A continuación, utilizando los valores obtenidos de la media de resistencias obtenidos en las tablas 5, 6 y 7 se aplica la regla de las mezclas para cada propiedad con la siguiente fórmula obtenida con información de (Akay, 2015):

$$\sigma_{\text{Ladrillo Compuesto}} = (\sigma * x)_{\text{Plástico PET}} + (\sigma * x)_{\text{Plástico PP}} + (\sigma * x)_{\text{Hormigón}}$$

Donde: σ : Resistencia; x : Fracción volumétrica.

a) Resistencia a la compresión del ladrillo compuesto:

Tabla 5

Media de las resistencias a la compresión.

Resistencia a la compresión, (MPa)		Media de datos agrupados
PET, (MPa)	50 – 60; 75.8 – 103	80.153
PP, (MPa)	42.9 – 45.1; 42 – 43.2; 34.8 – 39.6; 31.8 – 33.4	38.637
Hormigón, (MPa)	11.3 – 28	19.65

$$\sigma_{\text{Compresión del material Comp.}} = (80.15 * 0.35) + (38.64 * 0.35) + (19.65 * 0.3) =$$

$$\sigma_{\text{Compresión del material Compuesto}} = 47.47 \text{ MPa}$$

b) Resistencia a la Flexión del ladrillo compuesto:

Tabla 6

Media de las resistencias a la flexión.

Resistencia a la Flexión		Media de datos agrupados
PET, (MPa)	50 – 60; 70 - 75	60.833
PP, (MPa)	32.1 – 55.5; 45 – 50.2; 38.4 – 39.1; 31.3 – 35.9	42.894
Hormigón, (MPa)	3 – 17	10

$$\sigma_{\text{Flexión del material Compuesto}} = (60.833 * 0.35) + (42.894 * 0.35) + (10 * 0.3) =$$

$$\sigma_{\text{Flexión del material Compuesto}} = 39.304 \text{ MPa}$$

Tabla 7

Media de las resistencias a la tracción.

Resistencia a la tracción		Media de datos agrupados
PET, (MPa)	55 – 60; 70 - 75	65
PP, (MPa)	36.2 – 49; 35 – 36; 29 – 33; 26 – 50	38.68

Hormigón, (MPa)	1.1 – 2.8	1.95
-----------------	-----------	------

$$\sigma_{\text{Tracción del material Compuesto}} = (65 * 0.35) + (38.68 * 0.35) + (1.95 * 0.3) =$$

$$\sigma_{\text{Tracción del material Compuesto}} = 36.873 \text{ MPa}$$

Otra forma de obtener una aproximación simplificada para ilustrar el concepto de cómo se pueden calcular propiedades mecánicas efectivas usando un enfoque de regla de mezclas es de la siguiente manera:

$$\sigma_{C \text{ del material compuesto}} = x_h * \sigma_{C, \text{hormigón}} + \frac{3K(1+V)}{K(1+V) - \frac{1}{3}} * x_{\text{Plástico}} * (\sigma_{C, \text{Plástico}} - \sigma_{C, \text{hormigón}})$$

Donde K es el módulo a granel del material compuesto y V es el coeficiente de Poisson del material compuesto. Para simplificar se asumió que $K = K_h$ donde K_h es el modulo a granel del hormigón, además se tomó que $V = V_h$ donde V_h es el coeficiente de Poisson del hormigón. El coeficiente de Poisson del hormigón, $V = 0.185$, obtenido de los rangos proporcionados por Edupack, sacándoles la media de datos agrupados al igual que para el modulo a granel con un valor de, $K = 8.45 \text{ GPa}$ y la resistencia a la compresión del hormigón de 19.65 MPa . Para la resistencia a la compresión del plástico reciclado de los valores del PET y del PP de la tabla 5 se realizó un promedio dando como resultado 59.395 MPa .

$$\sigma_{C \text{ del material compuesto}} = 0.3 * 19.65 + \frac{3 * 8.45(1 + 0.185)}{8.45 * (1 + 0.185) - \frac{1}{3}} * 0.7 * (59.395 - 19.65)$$

$$\sigma_{C \text{ del material compuesto}} = 92.23 \text{ MPa}$$

Ahora, el modelo de Mori-Tanaka se basa en la mecánica de medios continuos y tiene en cuenta la interacción entre la matriz y las inclusiones. Aquí se contempla que el material compuesto consiste en una matriz continua de hormigón y una fase dispersa que corresponde al plástico que se encuentra distribuida, de manera homogénea en la matriz y tiene una pequeña región donde las

propiedades varían de forma sutil. Se supone que las inclusiones tienen una forma y distribución regular, lo que permite simplificar el análisis. Ya que se tienen en cuenta aspectos como la interacción entre las fases y el tamaño de las partículas hace que se obtengan estimaciones más precisas.

Los ladrillos propuestos en el presente trabajo consisten de un material compuesto en una matriz de hormigón y partículas de plástico dispersas uniformemente dentro de ella. Las inclusiones afectan las propiedades mecánicas globales del material y utilizando el modelo de Mori-Tanaka se calculó la propiedad efectiva del material compuesto, la resistencia a la compresión manteniendo las proporciones usadas en el modelo de la regla de las mezclas de fracción volumétrica 30% = $x_h = 0.3$ para el hormigón y la fracción volumétrica de plástico es del 70% = $x_p = 0.7$, donde 0.35 corresponde a la fracción de plástico PET(xpet) y los otros 0.35 de PP (xpp).

Usando el modelo de Mori-Tanaka, se calcula la resistencia a la compresión con la siguiente expresión (H. Tan, Y. Huang, C. Liu, P.H. Geubelle, 2005), (Buryachenko, 2007):

$$\frac{\sigma_{efectiva} - \sigma_m}{\sigma_m + \frac{\sigma_f - \sigma_m}{\varphi}} = \frac{V_f}{V_m} * \frac{\sigma_f - \sigma_m}{\sigma_f + \frac{\sigma_m}{\varphi}} \quad (1)$$

Donde:

$\sigma_{efectiva}$: es la resistencia a la compresión efectiva del material compuesto

σ_m : resistencia a la compresión del material matriz (hormigón). = 19.65 MPa

σ_f : resistencia a la compresión del material de refuerzo (plástico) = 59.395 MPa.

V_m : Fracción volumétrica del material matriz,(hormigón) = 0.3

V_f : Fracción volumétrica del material de refuerzo, (plástico) = 0.7

ϕ : es el factor de forma que depende de la geometría y la distribución de las partículas (toma valores entre 1 y 3)= 2

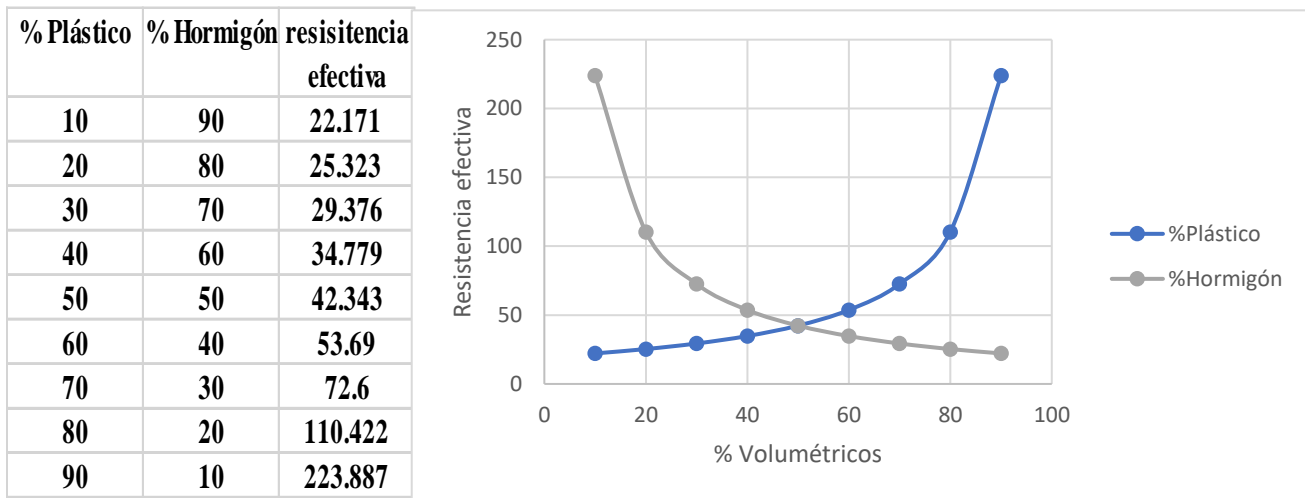
Resolviendo de la ecuación (1) y reemplazando los valores podemos encontrar el valor de la resistencia efectiva del ladrillo compuesto, el $\sigma_{efectiva} = 72.01$ MPa. Este valor sería la predicción de la resistencia a la compresión del ladrillo compuesto mediante el modelo de Mori – Tanaka.

Teniendo en cuenta estos datos mencionados anteriormente que el ladrillo de arcilla con una densidad de $1.98e3 - 2,07e3$ kg/m³, tiene una resistencia a la tracción de * 6.9 - 14 MPa, una resistencia a la compresión entre * 69 - 140 MPa, resistencia a la flexión * 8.3 - 16.8 MPa, y resistencia a la fatiga a 10^7 ciclos * 7.96 - 9.29 MPa. Ahora, las propiedades mecánicas para los ladrillos con designación de ingeniería y densidad de $2.1e3 - 2.5e3$ kg/m³, tiene una resistencia a la tracción de 5 – 15 MPa, una resistencia a la compresión entre *45 - 150 MPa, resistencia a la flexión o módulo de rotura de 5 – 15 MPa. Ahora los datos obtenidos para el ladrillo compuesto mediante la regla de las mezclas y el modelo de Mori – Tanaka se encuentran dentro de estos rangos de los ladrillos de arcilla común y los de ingeniería. De esta forma interpretando los resultados obtenidos en las tablas comparándolos con las propiedades requeridas para los ladrillos, se deduce que se pueden obtener ladrillos compuestos con excelentes propiedades mecánicas reciclando una cantidad significativa de PET Y PP. Es importante tener en cuenta que el modulo a granel o módulo de elasticidad a volumen usado en el modelo Mori-Tanaka puede variar con el tiempo debido al curado del hormigón y a las condiciones ambientales en las que se encuentre expuesto, por lo tanto, para la aplicación es necesario realizar pruebas específicas para conseguir con datos experimentales el modulo a granel. De igual manera es fundamental

comprender que los rangos aquí mencionados para el hormigón pueden variar significativamente según la mezcla de concreto específica, el contenido de agregado, la relación agua- cemento entre otros factores. Para predecir la resistencia a la tracción y flexión de un material compuesto, es recomendable utilizar métodos específicos y apropiados para ese propósito, como ensayos de tracción y flexión en muestras del material compuesto y no el modelo Mori-Tanaka.

Figura 6

Diagrama de % volumétricos de plástico y hormigón vs resistencia efectiva.



5. Recomendaciones

Algunas recomendaciones a tener en cuenta sería realizar un balance de masa del sistema de fabricación y producción ladrillos. Para la selección de equipos a usar en el sistema sería una consideración importante a tener en cuenta el consumo energético de estos y factores ambientales como la emisión de CO₂ en conjunto al costo, presupuesto, seguridad, calidad, durabilidad, capacidad y rendimiento. Todos los ladrillos una vez fabricados deben ser evaluados mediante las Normas Técnicas Colombianas NTC 4026, 4076 y 4205.

6. Conclusiones

Considerando que la fabricación de ladrillos con material compuesto con hormigón-plástico reciclado puede ser realizado de una manera sencilla sin la necesidad de incorporar maquinaria o elementos sofisticados se concluye que es posible diseñar un proceso de fabricación de bloques de construcción que presenten propiedades mecánicas similares e incluso superiores a los bloques de uso convencional utilizando plásticos reciclables como materia prima. Aunque este modelo de sistema para la fabricación de bloques a base de plástico puede ser complementado para obtener una verificación y validación con la realización de pruebas de laboratorio utilizando la relación inicial hallada en este trabajo de grado con el fin de evaluar las propiedades mecánicas tenidas en cuenta aquí y realizar un análisis de los resultados de las pruebas de laboratorio y compararlos con las pruebas mecánicas para determinar si cumple con los estándares deseados o no y sí es necesario realizar ajustes en la proporción de los componentes para así lograr las propiedades mecánicas óptimas. Por otro lado, es importante tener en cuenta que la regla de mezclas proporciona estimaciones aproximadas y simplificadas de las propiedades mecánicas del material compuesto, mientras que el modelo Mori-Tanaka es un método más avanzado para calcular las propiedades efectivas de materiales compuestos, puesto que tiene en cuenta la geometría, la distribución e interacción de la matriz en las inclusiones, pero su aplicación puede requerir datos detallados y ciertas simplificaciones geométricas para obtener resultados. De igual manera sigue siendo una aproximación, ya que, al asumir una distribución homogénea de inclusiones y una geometría regular, es algo que puede no ser realista en todos los casos aplicados.

Referencias Bibliográficas

- Aynharan, S., Faris, M. U., Banu, M. H. F. A., Joachim, D. S., & Fernando, P. R. (2023). Utilization of Waste Plastic in the Way of Synthetic Bricks. *Theæ Asian Review Of Civil Engineering (Print)*, 12(1), 1-5. <https://doi.org/10.51983/tarce-2023.12.1.3493>
- Akay, M. (2015). *An introduction to polymer-matrix composites* (1.^a ed.). Mustafa Akay. <https://bookboon.com/premium/books/an-introduction-to-polymer-matrix-composites>
- Brooks, A., Jambeck, J., & Mozo-Reyes, E. (2020). Plastic waste management and leakage in Latin America and the Caribbean. *Technical Note N° IDB-TN-02058*.
- Buryachenko, V. A. (2007). *Micromechanics of Heterogeneous Materials*. Springer.
- Colombia, S. (2022, abril 11). Materiales de construcción: clasificación, usos y estilos. Stretto Colombia. <https://www.strettocolombia.com/post/materiales-de-construccion-clasificacion-usos-y-estilos>
- De Prensa, S. (s. f.). *Gobierno unifica el código de colores para la separación de residuos en la fuente a nivel nacional | Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*. <https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/noticias-minambiente/4595-gobierno-unifica-el-codigo-de-colores-para-la-separacion-de-residuos-en-la-fuente-a-nivel-nacional>
- El uso del plástico para la construcción de carreteras. (2015, julio 21). Pruebaderuta.com | Más que un blog de automóviles; Pruebaderuta.com. <https://www.pruebaderuta.com/el-uso-del-plastico-para-la-construccion-de-carreteras.php>
- EasyBrick*. (s. f.-a). <https://easy-brick.com/que-es-easybrick/>

- Fajardo, A. (2021, junio 17). Colombia aspira a que en 2030 el 100 % de los plásticos de un solo uso del mercado sean reutilizables o compostables. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/colombia-aspira-a-que-en-2030-el-100-de-los-plasticos-de-un-solo-uso-del-mercado-sean-reutilizables-o-compostables/>
- Gerardi, J. (2021, diciembre 21). Los 5 materiales de construcción más comunes. ProEst. <https://proest.com/es/construccion/consejos/common-materials/>
- Greenpeace. (2018). Colombia, mejor sin plásticos.
- H. Tan, Y. Huang, C. Liu, P.H. Geubelle. (2005). *The Mori–Tanaka method for composite materials with nonlinear interface debonding*, *International Journal of Plasticity*,. 21(10), 1890–1918. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S074964190400169X>
- Kaw, A. K. (2006). *Mechanics of composite materials* (2.^a ed.). https://sarrami.iut.ac.ir/sites/sarrami.iut.ac.ir/files/files_course/01-mechanics_of_composite_materials_sbookfi.org_.pdf
- Lamba, P., Kaur, D. P., Raj, S., & Sorout, J. (2022). Recycling/reuse of plastic waste as construction material for sustainable development: a review. *Environmental Science and Pollution Research International*, 29(57), 86156–86179. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16980-y>
- Mampostería estructural: el qué y el cómo. (2022, junio 3). 360 EN CONCRETO; Comunidad 360 En Concreto. <https://360enconcreto.com/blog/detalle/mamposteria-estructural/>
- Materiales de construcción, definición y clasificación. (s/f). E-construir.com. Recuperado el 1 de diciembre de 2022, de <http://e-construir.com/materiales/>

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 4026 Y NTC 4076 PARA BLOQUES Y LADRILLOS DE CONCRETO, PARA MAMPOSERÍA ESTRUCTURAL Y NO ESTRUCTURAL. (s/f). Com.co. Recuperado el 1 de diciembre de 2022, de <https://metroblock.com.co/wp-content/uploads/2019/11/bloques-estructurales-y-no-estructurales.pdf>

Nursyamsi, N., Indrawan, I. P. E., & Ramadhan, P. (2019). The influence of the usage of Idpe plastic waste as fine aggregate in light concrete bricks. *MATEC Web Of Conferences*, 258, 01006. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201925801006>

Rdv, A. (2017, febrero 27). *Los plásticos en la industria de la construcción*. Com.co; [rdv.com.co. https://rdv.com.co/los-plasticos-la-industria-la-construccion/](https://rdv.com.co/los-plasticos-la-industria-la-construccion/)

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2023). Informe Nacional de Disposición Final de Residuos Sólidos 2022. <https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/Informe-Nacional-de-Disposicion-Final-de-Residuos-Solidos-2022.pdf>

Tipos de Plástico. (s/f). Envaselia.com. Recuperado el 1 de diciembre de 2022, de <https://www.ensavelia.com/blog/tipos-de-plastico-id7.htm>

Tipos de plásticos: clasificación y reciclaje. (2023, 15 diciembre). *DKV Seguros*. <https://dkv.es/corporativo/blog-360/medioambiente/reciclaje/tipos-de-plasticos-clasificacion-reciclaje>

The Nature Conservancy. (2020, 10 abril). Detengamos el flujo de residuos plásticos. <https://www.nature.org/es-us/que-hacemos/nuestras-prioridades/ciudades-saludables/detener-residuos-plasticos/>.

Verma, A., Srivastava, A., Ray, B. K., & Yadav, D. (2022). Manufacturing of Brick by Waste Plastic. *International Journal Of Engineering Research In Mechanical And Civil Engineering (IJERMCE)*, 9(6), 41-45. <https://doi.org/10.36647/ijermce/09.06.a008>

Apéndices

Cálculos realizados en los resultados en la parte de métodos para estimar algunas propiedades de los ladrillos compuestos:

Resistencia a la compresión (Mpa)							
	rango		x:clase	f frecuencia	x*f	\bar{x} = Media de datos agrupados	Resistencia Promedio
PET	50.00	60.00	55.00	10.00	550.00	80.1527	59.3947
	75.80	103.00	89.40	27.20	2431.68		
PP	42.90	45.10	44.00	2.20	96.80	38.6367	
	42.00	43.20	42.60	1.20	51.12		
	34.80	39.60	37.20	4.80	178.56		
	31.80	33.40	32.60	1.60	52.16		
Hormigón	11.30	28.00	19.65	16.70	328.16	19.650	19.650

Resistencia a la flexión (Mpa)							
	rango		x:clase	f frecuencia	x*f	\bar{x} = Media de datos agrupados	
PET	50.00	60.00	55.00	10.00	550.00	60.8333	
	70.00	75.00	72.50	5.00	362.50		
PP	32.10	55.50	43.80	23.40	1024.92	42.8945	
	45.00	50.20	47.60	5.20	247.52		
	38.40	39.10	38.75	0.70	27.13		
	31.30	35.90	33.60	4.60	154.56		
Hormigón	3.00	17.00	10.00	14.00	140.00	10	

Resistencia a la Tracción (Mpa)							
	rango		x:clase	f frecuencia	x*f	\bar{x} = Media de datos agrupados	
PET	55.00	60.00	57.50	5.00	287.50	65	
	70.00	75.00	72.50	5.00	362.50		
PP	36.20	49.00	42.60	12.80	545.28	38.6789	
	35.00	36.00	35.50	1.00	35.50		
	29.00	33.00	31.00	4.00	124.00		
	26.00	50.00	38.00	24.00	912.00		
Hormigón	1.10	2.80	1.95	1.70	3.32	1.95	

Relación de Poisson ,V							
	rango		x:clase	f frecuencia	x*f	\bar{x} = Media de datos agrupados	
Hormigón	0.17	0.20	0.19	0.03	0.01	0.185	

Densidades (kg/m ³)						
	rango		x:clase	f frecuencia	x*f	\bar{x} = Media de datos agrupados
PET	25.91	27.92	26.91	2.01	54.06	27.1232
	27.52	28.12	27.82	0.60	16.76	
PP	900.00	909.00	904.50	9.00	8140.50	902.9250
	898.00	911.00	904.50	13.00	11758.50	
	896.00	905.00	900.50	9.00	8104.50	
	897.00	906.00	901.50	9.00	8113.50	
Hormigón	28.12	40.17	34.15	12.05	411.50	34.1454

Modulo a granel, K						
	rango		x:clase	f frecuencia	x*f	\bar{x} = Media de datos agrupados
Hormigón	5.80	11.10	8.45	5.30	44.79	8.45

				volumen total	
Fracción volumetrica del PET	0.35	35%		1	m ³
Fracción volumetrica del PP	0.35	35%			
Fracción volumetrica del Hórmigón	0.3	30%			
Masa del PET	9.493120018	2.83%			
Masa del PP	316.02375	94.12%			
Masa del Homigón	10.24362383	3.05%			
MASA TOTAL	335.7604938				
Resisitencia a la compresión (Mori- Tanaka)	92.2330	Mpa			
Factor forma	2				
Resistencia efectiva	72.600				