

Evaluación numérica de viviendas ecoamigables conformadas por botellas de plástico rellenas de arena y reforzadas con acero corrugado

Numerical evaluation of eco-friendly houses made of plastic bottles filled with sand and reinforced with rebar steel

Avaliação numérica de casas ecologicamente corretas compostas por garrafas plásticas preenchidas com areia e reforçadas com aço corrugado

Alexander Solarte Benavides¹
Hugo Alfredo Silva Ribón²
Elías Daniel David Nova Burgos³

Received: October 25th, 2022

Accepted: January 30th, 2023

Available: December 20th, 2023

How to cite this article:

A. Solarte Benavides, H. A. Silva Ribón y E. D. D. Nova Burgos, "Evaluación numérica de viviendas ecoamigables conformadas por botellas de plástico rellenas de arena y reforzadas con acero corrugado", *Revista Ingeniería Solidaria*, vol. 20, n.º 1, pp. 1-20, 2024.
doi: <https://doi.org/10.16925/2357-6014.2024.01.01>

Research article. <https://doi.org/10.16925/2357-6014.2024.01.01>

¹ Docente tiempo completo, Universidad Santo Tomás sede Villavicencio - Colombia.

Email: alexandersolarte@usantotomas.edu.co

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0087-9559>

CvLAC: https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001585684

² Docente Tiempo Completo, Universidad Santo Tomás sede Villavicencio - Colombia.

Email: hugo.silva@usantotomas.edu.co

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3851-6614>

CvLAC: https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000599794

³ Docente Tiempo Completo, Universidad Santo Tomás sede Villavicencio - Colombia.

Email: eliasnova@usantotomas.edu.co

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5853-4230>

CvLAC: https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001777120



Resumen

Este artículo presenta una evaluación experimental de cargas en casas ecoamigables hechas con botellas de plástico (PET) rellenas con arena y reforzadas con acero corrugado, en marco del proyecto "Diseño y modelación de muros formados por botellas de tereftalato de polietileno rellenas de arena y reforzadas con acero corrugado", desarrollado en la Universidad Santo Tomás, Villavicencio – Colombia, en el año 2022.

Introducción: el PET es un material pobremente biodegradable que se ha tornado un problema de contaminación medioambiental. Los sistemas de construcciones alternativas con botellas PET recicladas pueden suplir funciones de construcción, tomando ventaja de sus características mecánicas; también ayudan a reducir la contaminación medioambiental a través del reciclaje y reducen costos de construcción.

Metodología: las botellas fueron colocadas verticalmente y no horizontalmente como se hace generalmente, además, fueron reforzadas con acero corrugado para proveer estabilidad lateral al sistema propuesto. Para evaluar el sistema frente a diferentes escenarios de carga, se realizó una caracterización de las propiedades mecánicas de los elementos propuestos y se construyó un modelo de elementos finitos con el objetivo de representar una aproximación del comportamiento real de la casa que cumple los requerimientos de la NSR-10.

Resultados: se determinó que la estructura soportará las cargas impuestas, presentando un ISE de 0,8 para muros de carga y esta no presentará deformaciones excesivas de acuerdo a un IFL de 0,9.

Conclusiones: debido a que el modelo a escala soportó las cargas verticales, se demuestra que el sistema provee seguridad a sus ocupantes y que el sistema de construcción propuesto genera reducción en los costos.

Originalidad: aunque podemos encontrar casas construidas con botellas llenas con arena, estas, generalmente, se construyen con las botellas dispuestas horizontalmente. Este proyecto propone el estudio de casas fabricadas con botellas configuradas verticalmente, con el fin de reducir su espacio constructivo.

Limitaciones: en la práctica la caracterización de los atributos mecánicos del conjunto de materiales es naturaleza heterogénea, lo cual dificulta la alimentación de dichos atributos en los modelos de simulación. Por esto se propuso evaluar los atributos mecánicos del conjunto de materiales y asumirlos como homogéneos en el modelo.

Palabras clave: botellas de plástico, botellas llenas de arena, casas ecoamigables, sistemas de construcción alternativos.

Abstract

This paper presents an experimental evaluation of eco-friendly houses made of plastic bottles (PET) filled with sand and reinforced with rebar steel. The study was carried out in the structure's laboratory located in Santo Tomas University, Villavicencio – Colombia. In 2022.

Introduction: PET is a poorly biodegradable material that has become an environmental pollution problem. Alternative construction systems with PET bottle recycling can supply construction functions taking advantage of their mechanical characteristics, as well as reduce environmental pollution through recycling and lowering construction costs.

Methods: The bottles and reinforcing steel were placed vertically to provide lateral stability to the proposed system. A characterization of the mechanical properties of the proposed elements was carried out and a numerical model was built in finite elements with the aim of representing an approximation of the real behavior of a house that meets the requirements of the NSR-10.

Results: It was determined that the structure will support the loads by calculating an ISE of 0.8 for load-bearing walls and that it does not present excessive deformations according to an IFL of 0.9.

Conclusions: The house supported the vertical loads, demonstrating that the system provides security to its occupants and that the construction system generates a reduction in costs.

Originality: Although we can find houses built with bottles filled with sand, they are generally built with the bottles placed horizontally. This project proposes the study of houses made up of bottles located vertically in order to take advantage of their geometric properties and increase compressive strength.

Limitations: In practice, the characterization of the mechanical attributes of the set of materials is heterogeneous in nature, which makes it difficult to feed these attributes in the simulation models. For this reason, it was proposed to evaluate the mechanical attributes of the set of materials and assume them as homogeneous in the model.

Keywords: Filled PET bottles, alternative construction systems, eco-friendly houses, plastic bottles.

Resumo

Este artigo apresenta uma avaliação experimental de cargas em casas ecológicas feitas com garrafas plásticas (PET) cheias de areia e reforçadas com aço corrugado, no âmbito do projeto "Projeto e modelagem de paredes formadas por garrafas de tereftalato de polietileno cheias de areia e reforçado com aço corrugado", desenvolvido na Universidade Santo Tomás, Villavicencio – Colômbia, em 2022. Introdução: O PET é um material pouco biodegradável que se tornou um problema de poluição ambiental. Sistemas construtivos alternativos com garrafas PET recicladas podem suprir funções construtivas, aproveitando suas características mecânicas; Eles também ajudam a reduzir a poluição ambiental por meio da reciclagem e a reduzir os custos de construção.

Metodologia: as garrafas foram colocadas verticalmente e não horizontalmente como geralmente é feito, além disso, foram reforçadas com aço corrugado para proporcionar estabilidade lateral ao sistema proposto. Para avaliar o sistema frente a diferentes cenários de carregamento, foi realizada uma caracterização das propriedades mecânicas dos elementos propostos e construído um modelo de elementos finitos com o objetivo de representar uma aproximação do comportamento real da casa que atenda aos requisitos da NSR-10.

Resultados: determinou-se que a estrutura suportará as cargas impostas, apresentando ISE de 0,8 para paredes estruturais e não apresentará deformações excessivas conforme IFL de 0,9. Conclusões: como a maquete suportou as cargas verticais, demonstra-se que o sistema proporciona segurança aos seus ocupantes e que o sistema construtivo proposto gera redução de custos. Originalidade: embora possamos encontrar casas construídas com garrafas cheias de areia, estas geralmente são construídas com as garrafas dispostas horizontalmente. Este projeto propõe o estudo de casas feitas com garrafas configuradas verticalmente, de forma a reduzir o seu espaço de construção. Limitações: na prática a caracterização dos atributos mecânicos do conjunto de materiais é de natureza heterogênea, o que dificulta a alimentação desses atributos nos modelos de simulação. Por esse motivo, propôs-se avaliar os atributos mecânicos do conjunto de materiais e assumi-los como homogêneos no modelo.

Palavras-chave: garrafas plásticas, garrafas cheias de areia, casas ecológicas, sistemas construtivos alternativos

1. Introducción

El polietileno tereftalato (PET) es un material con el que convivimos en nuestro día a día, se encuentra en grandes cantidades en el planeta, desde envases de alimentos,

cosméticos, bolsos, cortinas, utensilios, en general. El PET es un material poco biodegradable y se ha convertido en un problema de sobreacumulación en los rellenos sanitarios, pues crea fuertes impactos ambientales debido a prolongado proceso de descomposición [1], altos costos de disposición y gran oposición para ser incinerado por sus impactos ambientales [2], [3]. Además, las construcciones sustentables buscan incorporar materiales reciclables para reducir el consumo de energía en la creación de nuevos materiales para la construcción [4], por esto, se recomienda reciclar estos residuos plásticos aprovechando sus características mecánicas como una alternativa sustentable, económica y de mitigación de la contaminación.

La contaminación por exceso de material plástico PET y la falta de vivienda digna propia en comunidades de escasos recursos son dos grandes retos que enfrenta el país actualmente. Según un estudio de la ONU, se estima que cada año se producen más de 300 millones de toneladas de plásticos, la mayoría de los cuales terminan en los mares y océanos [5]. Cabe destacar que la consecuencia de la contaminación no solo está afectando al medio ambiente, también tiene efectos nocivos en la salud [6], debido a que este problema aumenta el riesgo de padecer enfermedades respiratorias, como cáncer de pulmón, neumonía y enfermedades cardiovasculares [7]. Por otro lado, en Colombia aproximadamente 250.000 familias no cuentan con una vivienda digna propia, sin incluir la población afectada por la ocurrencia de fenómenos naturales o el desplazamiento forzado, muy común en el país [8], [9]. Con el uso de materiales no convencionales de construcción, estas comunidades podrían suplir la necesidad de vivienda [10].

Para la mitigación de dicha contaminación, durante los últimos años se han presentado diferentes ideas como la sustitución o reemplazo de materiales de construcción convencionales, como concreto, acero de refuerzo y mampostería, por sistemas alternativos o materia prima no convencional, como materiales reciclados. A nivel internacional, en Estados Unidos, en 1970, se realizó la construcción de las "earthships" o "naves tierra", casas construidas con materiales reciclables por el arquitecto estadounidense Michael Reynolds. Uno de sus primeros trabajos es la casa "el pulgar" (*thumb house*), utilizando latas de cerveza llenas de arena unidas por mortero [11]. Por otro lado, a nivel latinoamericano, en Honduras, en 2001, se inició un gran movimiento ecologista con el alemán Andreas Froese, utilizando botellas acostadas rellenas con tierra compactada para la construcción de tanques de agua, muros perimetrales y columnas, posteriormente, estas técnicas se replicaron en países como Bolivia, Guatemala y Colombia [4]. A escala nacional se destaca el proyecto de viviendas comunitarias con muros conformado por botellas PET (acostadas) rellenas de tierra. Se realizaron ensayos de carga (fuerza) máxima a compresión a botellas de

diferentes capacidades (600, 1500 y 2000 ml) con diferentes materiales de relleno (escombro, tierra arenosa, minirrelleno sanitario y vacías). Los autores concluyeron que las botellas con capacidades (volúmenes) de 600 ml y rellenas de escombro fueron las que presentaron mayor resistencia a la compresión [8]. En dicho estudio también se mostraron los resultados de pruebas de volteo de muros y niveles de deformación para tanques de agua contruidos con botellas rellenas de arena y recubrimiento de plásticos para impermeabilización.

Los estudios de [12] y [4] han sido de los primeros ejemplos de simulación del comportamiento de elementos estructurales contruidos con materiales no convencionales. Sin embargo, la investigación no fue terminada en su totalidad y se tiene la posibilidad de caracterización mecánica de los materiales no convencionales para ser simulados y analizados en *software* de diseño.

Damiani *et al.* [13] plantearon el uso de fibras de caucho como agregado para la elaboración de ladrillos de concreto, sin embargo, para poder preparar el caucho se debe moler, lo cual requiere adicionar energía en esta actividad y equipamiento adicional.

En este proyecto se plantea el estudio de la implementación de elementos conformados por botellas PET rellenas de arena ubicadas de manera vertical con el objetivo de reforzarlas con acero longitudinal. Para lograrlo, se realizaron ensayos de caracterización de las propiedades mecánicas de los especímenes. Además, se elaboró el diseño arquitectónico y estructural de un prototipo de vivienda utilizando las propiedades mecánicas de los materiales en el *software* de elementos finitos Sap2000.

2. Materiales y métodos

2.1 Conformación de especímenes

El estudio se llevó a cabo en la Universidad Santo Tomás sede Villavicencio, mediante un diseño experimental de tipo factorial cuantitativo. La conformación de los especímenes se realizó mediante la recolección de botellas de plástico mediante reciclaje. Los tipos de botellas seleccionados fueron de marcas: jugos Hit, Coca-Cola y agua Cristalina, ya que cada tipo de envase presenta una geometría diferente representativa a otras marcas. Se relleno cada botella con arena en tres capas, y se compactaron. Las botellas se unieron mediante un amarre perimetral con alambre dulce como se observa en la figura 1.



Figura 1. Bloques tipo para ensayos de laboratorio.
Fuente: elaboración propia.

La arena utilizada se caracterizó mediante un ensayo de granulometría. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 1 y en la figura 18.

2.2 Ensayos de laboratorio

Con los tres tipos de especímenes conformados por botellas de plástico rellenas de arena, se realizaron los ensayos de compresión axial, hasta fallar los especímenes con una deformación excesiva, en la máquina universal del laboratorio de concretos. En las figuras 2 y 5 se muestra el cambio físico, antes y después de la falla para botellas de jugos Hit, de similar manera las figuras 3 y 6 para el bloque de Coca-Cola y en las figuras 4 y 7 para el bloque elaborado con las botellas de Cristalina.



Figura 2. Bloque tipo 1 antes del ensayo.
Fuente: elaboración propia.



Figura 3. Bloque tipo 2 antes del ensayo.
Fuente: elaboración propia.



Figura 4. Bloque tipo 3 antes del ensayo.
Fuente: elaboración propia.



Figura 5. Bloque tipo 1 después del ensayo.
Fuente: elaboración propia.



Figura 6. Bloque tipo 2 después del ensayo.
Fuente: elaboración propia.



Figura 7. Bloque tipo 3 después del ensayo.
Fuente: elaboración propia.

2.3 Caracterización de las propiedades mecánicas de los especímenes

A partir de la adquisición de información de los resultados de los ensayos de laboratorio, se realizó el procesamiento de la información para determinar la caracterización de las propiedades mecánicas de los bloques. En la figura 8 se presenta la curva esfuerzo vs. deformación unitaria para el ensayo de carga axial en su rango lineal. Se logra evidenciar que las curvas de cada tipo de botella presentan un comportamiento similar. La pendiente del rango lineal de la gráfica representa el módulo de elasticidad de cada material, también llamado rango elástico, y el valor máximo representa el esfuerzo de compresión, el cual se logra cuando el conjunto de materiales contiene deformaciones excesivas o hay rompimiento del material.

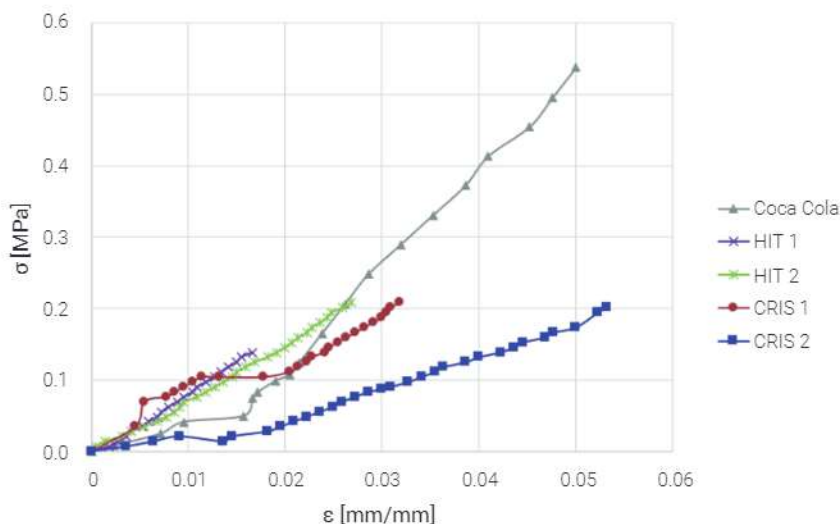


Figura 8. Curva esfuerzo vs. deformación unitaria para el ensayo a carga axial.
Fuente: elaboración propia.

En la figura 9 se logra apreciar que el bloque de Coca-Cola presenta un mayor módulo de elasticidad (13,4 MPa) en comparación a los demás módulos (8,2 MPa para Hit, 4,9 MPa para Cristalina, debido principalmente a su mayor espesor de botella de 215/1000 mm, seguido de las botellas de Hit, con espesor de 200/1000 mm y Cristalina de 150/1000 mm. Adicionalmente, se evidencia que la resistencia a la compresión de las botellas de Cristalina fue 1,89 MPa, mientras que para Hit fue 1,63 MPa y Coca-Cola 1,80 MPa.

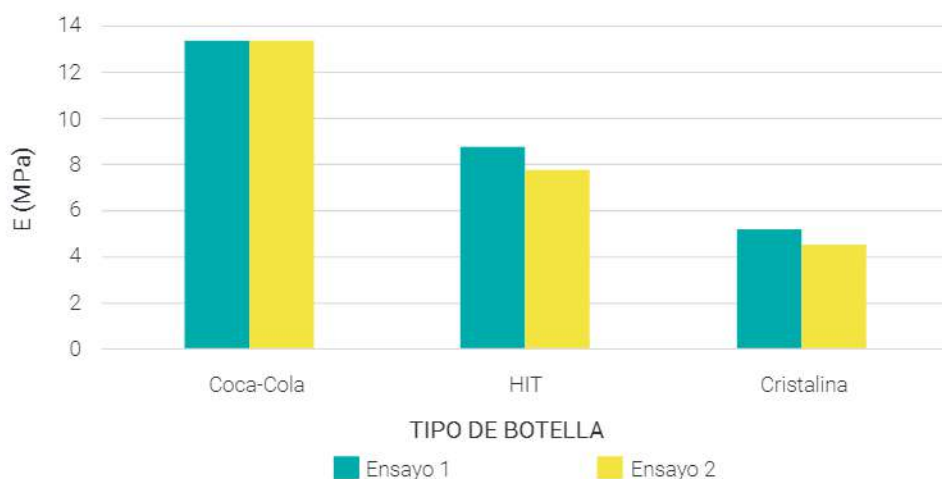


Figura 9. Comparación módulo de elasticidad de cada tipo de botella.
Fuente: elaboración propia.

En la figura 10 se puede apreciar que los módulos conformados por botellas Cristalina logran en promedio obtener un mayor esfuerzo a compresión. Estos resultados se le atribuyen a su forma geométrica, ya que este tipo de botella presenta un cuello de menor longitud, con una forma aproximada a un cilindro, que implica un área efectiva mayor a los demás módulos de botellas. Esto genera que la carga se distribuya de manera uniforme en el elemento y se alcance un mayor esfuerzo axial.

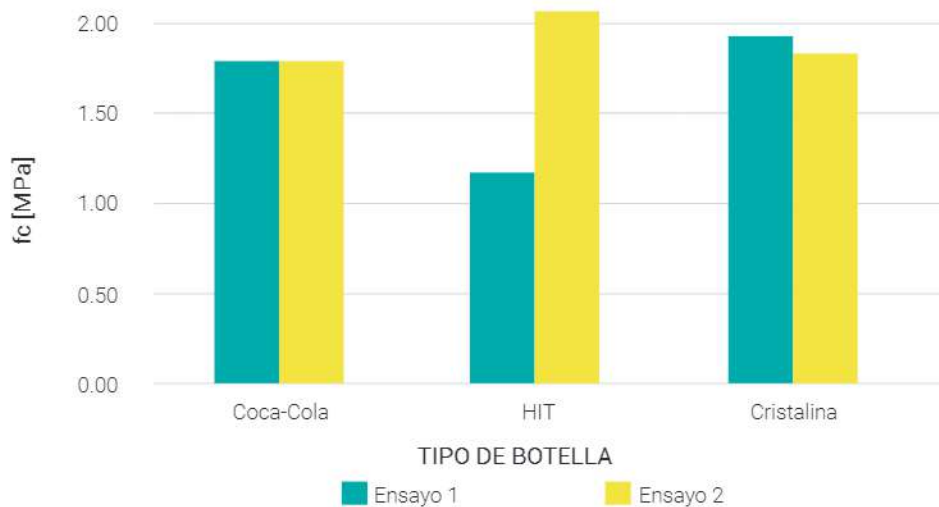


Figura 10. Comparación esfuerzo de compresión de cada tipo de botella.

Fuente: elaboración propia.

2.4 Calibración modelo en elementos finitos (EF)

Se construyó un modelo simplificado en elementos finitos (EF) mediante el *software* Sap2000 que representa el ensayo de laboratorio. Se definió un elemento tipo *frame* con sección de 12 cm x 12 cm. El componente se representó mediante un material lineal elástico, con módulo de elasticidad igual a 5,3 MPa que representa el promedio de los resultados obtenidos, considerando los valores que salían de tendencia como *outliers*. En la figura 11 se puede observar el modelo simplificado en EF. Al modelo se le asignó el registro de carga del ensayo de laboratorio en la parte superior del elemento. Se obtuvieron los desplazamientos generados a partir de la carga y se construyó la curva esfuerzo-deformación. Esta gráfica se comparó con las obtenidas del ensayo experimental, lo cual se puede observar en la figura 12.

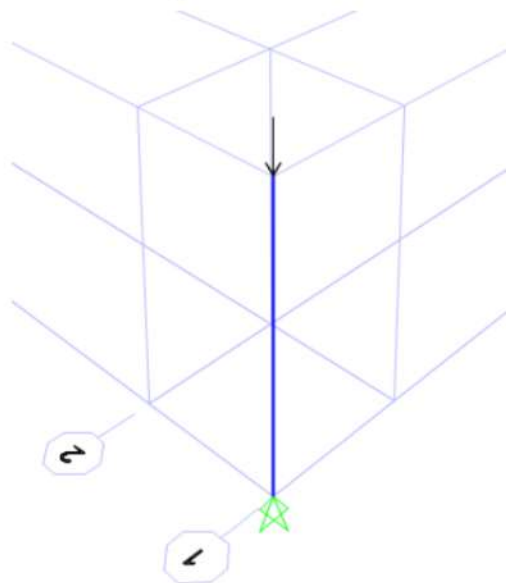


Figura 11. Modelo simplificado en elementos finitos del ensayo de laboratorio.
Fuente: elaboración propia.

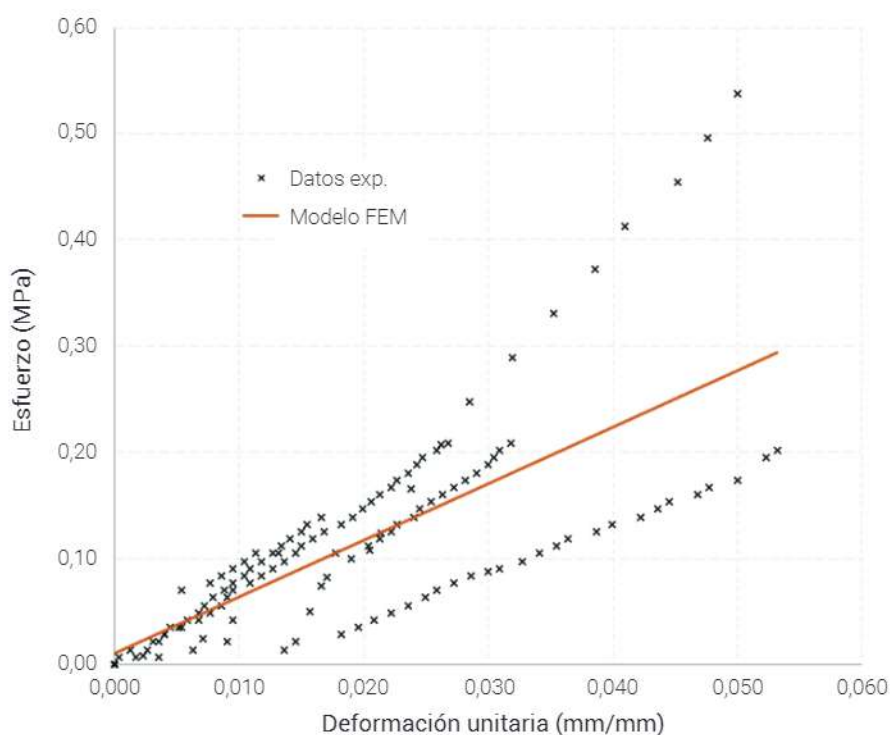


Figura 12. Comparación de las curvas esfuerzo-deformación experimental vs. modelo.
Fuente: elaboración propia.

2.5 Diseño arquitectónico del prototipo de vivienda con muros PET

Se realizó el diseño arquitectónico de un prototipo de vivienda de un piso que cumpla con las necesidades básicas de la comunidad de bajos recursos de los Llanos Orientales. En la figura 13 se presenta el diseño arquitectónico propuesto.

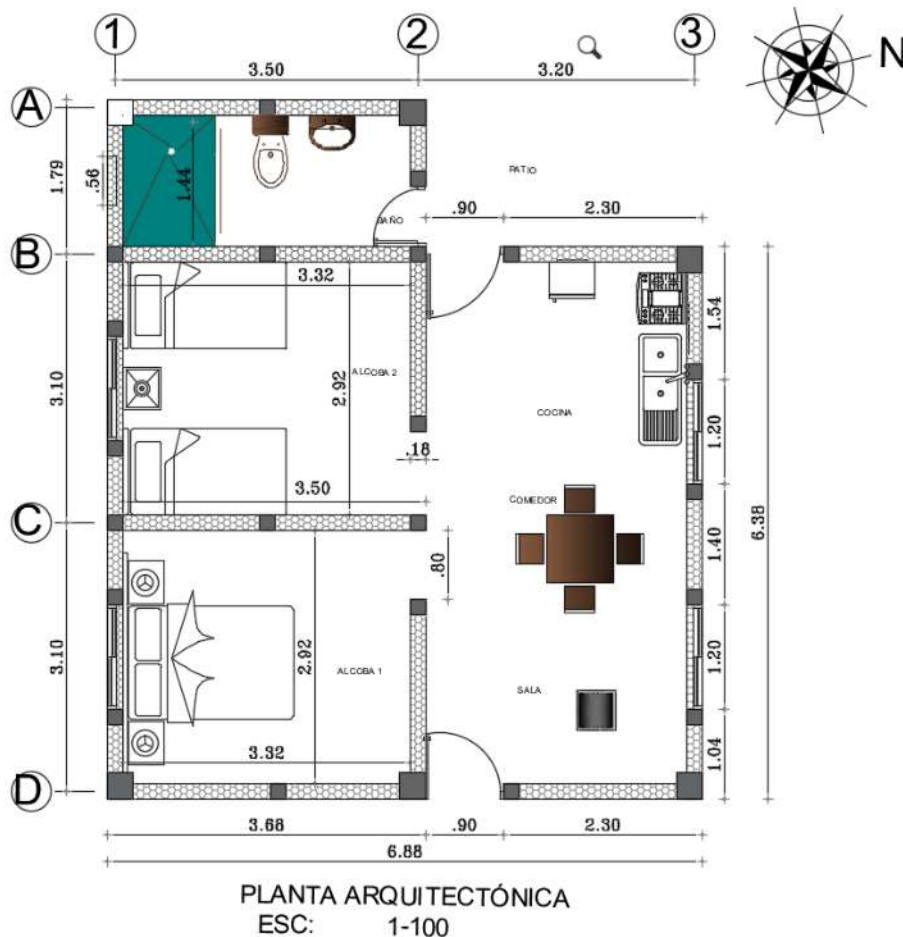


Figura 13. Propuesta arquitectónica de vivienda.

Fuente: elaboración propia.

2.6 Modelo numérico en elementos finitos (EF)

Se utilizó el *software* de EF Sap2000 para construir un modelo que represente una aproximación de la realidad de la construcción de viviendas según el diseño arquitectónico. Se utilizaron las propiedades mecánicas de los especímenes para definir

el material de los elementos estructurales del modelo matemático. En la figura 14 se puede apreciar el modelo. Se utilizó el material obtenido a partir de la calibración del modelo en EF. Las dimensiones de los elementos estructurales como columnetas de confinamiento se definieron con una sección de 18 cm x 18 cm con una barra de acero de refuerzo de diámetro de 3/8" y los muros con un espesor de 12 cm.

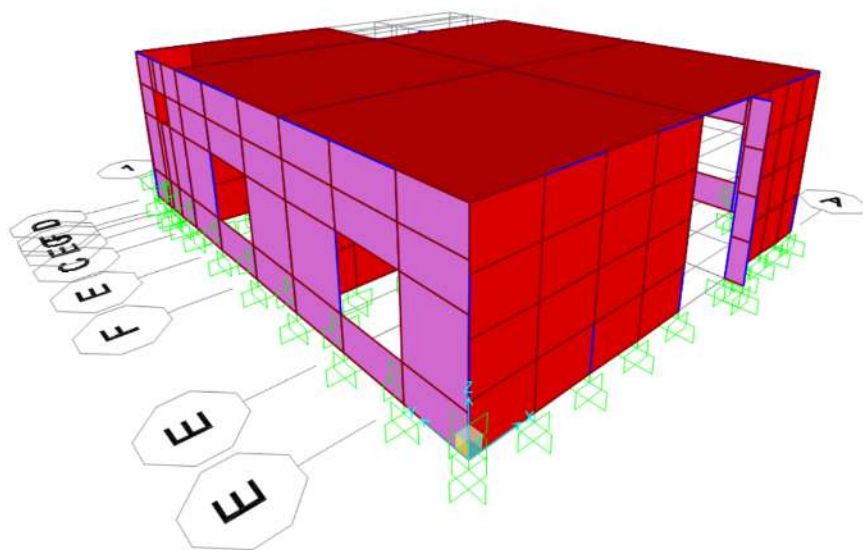


Figura 14. Modelo en elementos finitos (EF).

Fuente: elaboración propia.

2.7 Evaluación estructural del prototipo de vivienda con muros PET

Se realizó la evaluación del prototipo de vivienda propuesta mediante el modelo en elementos finitos sometido ante las solicitaciones del Título B de la norma de construcción sismo resistente (NSR-10) [14]. Se asignó una carga viva de 50 kg/m² que representa el peso de las personas en el caso de mantenimiento en la cubierta y una carga de 10 kg/m² que representa el peso de las tejas. En la figura 15 se puede observar los esfuerzos generados sobre los elementos estructurales tipo área a partir de la evaluación de la combinación de la mayoración de las cargas.

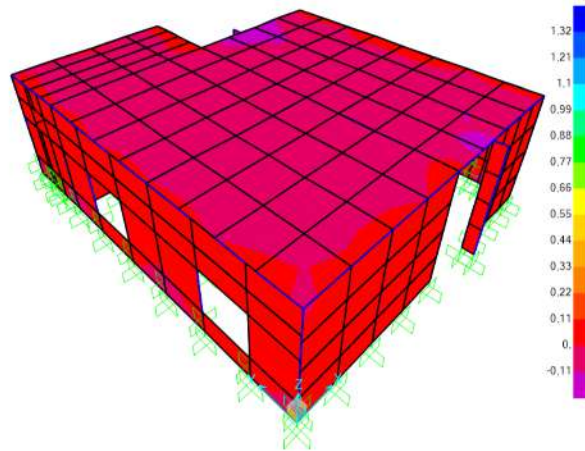


Figura 15. Esfuerzos sobre elementos estructurales.
Fuente: elaboración propia.

Se determinó la relación entre los esfuerzos de compresión generados sobre la estructura y los esfuerzos que puede soportar el material según la caracterización de las propiedades mecánicas de los materiales, donde el mayor esfuerzo a compresión se tomó como 1,6 MPa que representa el promedio de los resultados obtenidos. Esta relación se conoce como el índice de sobreesfuerzo (ISE). El mayor ISE obtenido de la estructura fue 0,2.

Para los esfuerzos a tensión generados sobre la estructura, se pretende que los soporten las columnas y vigas de confinamiento, ya que son elementos con acero de refuerzo. Se determinaron las fuerzas internas de los elementos como se puede observar en la figura 16. Los valores máximos y mínimos se presentan en la tabla 2.

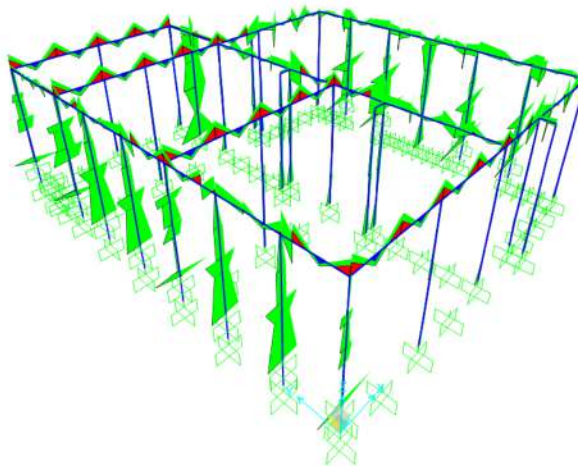


Figura 16. Diagramas de fuerzas internas sobre elementos de confinamiento.
Fuente: elaboración propia.

Para determinar el momento resistente a flexión de los elementos de confinamiento se utilizó la ecuación que se muestra a continuación:

$$\Phi M_n = \Phi A_s f_y \left(d - \frac{A_s f_y}{1.7 f_c b} \right) = 0.96 \text{ [kN} \cdot \text{m]}$$

Donde,

Φ = Factor de reducción a flexión (0,9)

A_s = Área de acero de refuerzo ($0,71 \times 10^{-4} \text{ m}^2$)

f_y = Esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo (420 MPa)

f_c = Esfuerzo de compresión resistente (1,8 MPa)

d = Altura efectiva de la sección (0,09m)

b = Base de la sección (0,18m).

Teniendo en cuenta lo anterior, se determinó el ISE a flexión de 0,05.

Adicionalmente, se determinó la relación entre los desplazamientos obtenidos de los elementos estructurales y los desplazamientos límite según la NSR-10. Esta relación se conoce como el índice de flexibilidad (IFL). El mayor IFL obtenido de la estructura fue 0,4. En la figura 17 se evidencia la deformada del modelo en EF.

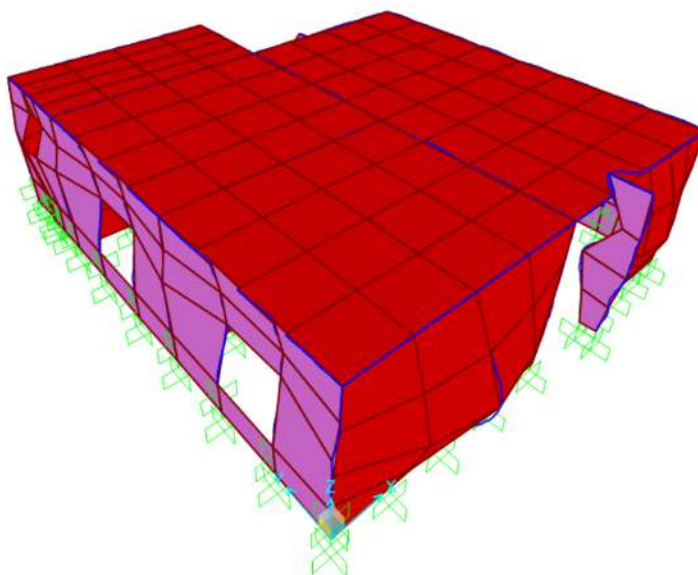


Figura 17. Deformada del modelo en EF.

Fuente: elaboración propia.

3. Resultados

Tabla 1. Valores ensayo de granulometría arena utilizada para el relleno de las botellas PET.

Abertura tamiz		Peso retenido (kg)	% retenido	% retenido acumulado	% pasante
in	mm				
0,50	12,70	0,024	2,67	2,67	97,33
0,25	6,35	0,306	34,00	36,67	63,33
0,19	4,75	0,013	1,44	38,11	61,89
0,09	2,38	0,041	4,56	42,67	57,33
0,07	1,68	0,3	33,33	76,00	24,00
0,05	1,19	0,051	5,67	81,67	18,33
0,02	0,59	0,118	13,11	94,78	5,22
0,01	0,30	0,036	4,00	98,78	1,22
0,01	0,15	0,01	1,11	99,89	0,11
0,00	0,08	0,001	0,11	100,00	0,00
Total		0,9	100		

Fuente: elaboración propia.

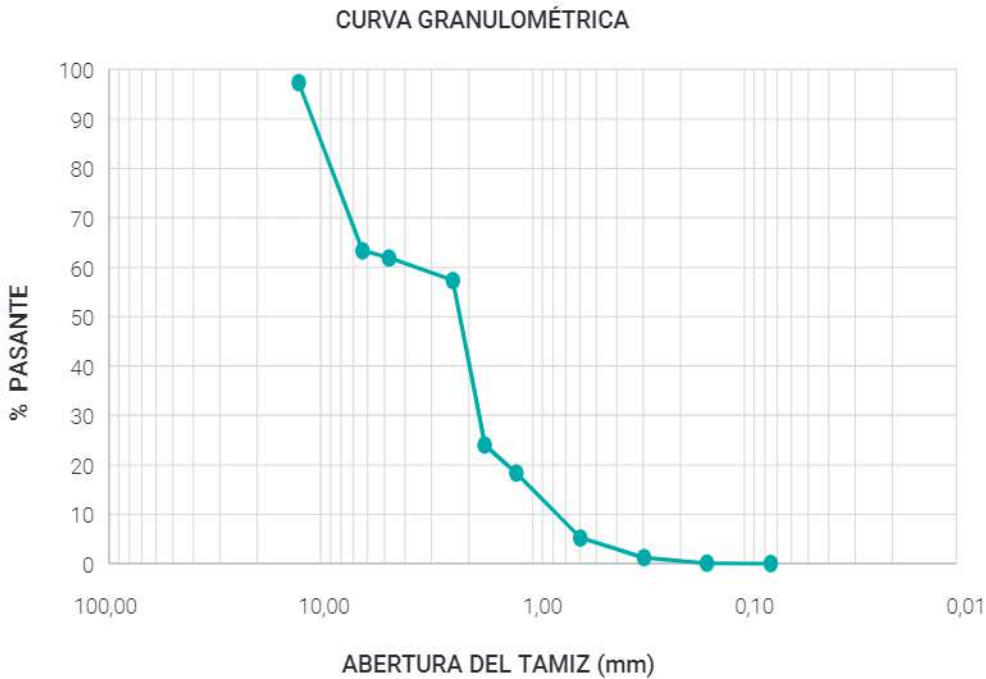


Figura 18. Curva granulométrica de la arena.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Valores máximos y mínimos de las fuerzas internas sobre elementos de confinamiento.

	P	V2	V3	T	M2	M3
	[KN]	[KN]	[KN]	[KN-m]	[KN-m]	[KN-m]
Max	0,59	0,98	0,63	0,05	0,05	0,05
Min	-2,38	-1,04	-0,63	-0,05	-0,05	-0,05

Fuente: elaboración propia.

4. Discusión y conclusiones

En el presente estudio se propuso cambiar la configuración tradicional de las botellas rellenas de arena de forma acostada (horizontal) a una forma parada (vertical). El mayor esfuerzo de compresión promedio lo lograron las botellas paradas de Coca-Cola con 1,48 MPa. Espinosa [4] encontró una resistencia a la compresión entre 2,02 y 5,83 MPa y desplazamientos axiales de 37,5 y 96,5 mm para botellas paradas de Peñafiel de espesor 0,45 mm de 600 m (envase similar al de Coca-Cola), mientras que Oyínola *et al.* [15] encontraron 0,025 MPa de resistencia a la compresión. Estos ejemplos muestran que hay una gran variación (0,025-5,83 MPa) en los resultados de la resistencia de compresión promedio para botellas paradas. Sin embargo, cuando las botellas están acostadas (de forma horizontal) se logran resistencias a la compresión de 11,16-38,4 MPa como se presenta en los estudios de [16]-[18], respectivamente. Otros autores, como [19], encontraron resistencias a la compresión axial de 2,55 a 2,95 MPa para botellas rellenas con plástico reciclado. Esta alternativa busca reciclar aún más plástico de un solo uso, pero requiere de mayor energía para compactación y preparación.

De los resultados de las propiedades mecánicas de los materiales se logra evidenciar que a mayor espesor (mm) de la botella se logra un mayor módulo de elasticidad como el caso de los módulos formados por botellas de Coca-Cola. Analizando los resultados de los esfuerzos a compresión, se demostró que los elementos conformados por botellas Cristalina presentan el mayor valor, ya que su forma cilíndrica permite que la carga se distribuya uniforme en toda la longitud de la botella y no se genere un efecto de pandeo como le ocurrió a las demás botellas debido a su forma geométrica.

La comparación de los resultados de las gráficas de caracterización de los modelos en elementos finitos con los resultados experimentales demuestra una calibración óptima, ya que se obtuvieron errores menores al 2 %.

El esfuerzo a la compresión de las botellas paradas rellenas de arena es inferior, al menos 5 veces la magnitud, que el esfuerzo de botellas acostadas según el estado del arte. Sin embargo, los módulos verticales propuestos, con las botellas amarradas con alambre dulce y reforzadas con acero de corrugado, generan un módulo de elasticidad y esfuerzo de compresión mayor.

Aunque las botellas de Cristalina presentan un mayor esfuerzo a la compresión, las botellas de Coca-Cola presentan un mejor rendimiento en término de esfuerzo-deformación, debido a que no solo resiste la carga, sino también brinda mejor funcionalidad al presentar menores valores de deformación.

Por otro lado, de los resultados de esfuerzos del modelo en elementos finitos se puede concluir que los muros MPET soportan las cargas verticales, ya que se obtuvo un ISE del 0,2. La ventaja de este sistema es que se supone que cada elemento está aportando a la resistencia de la estructura, y esto genera una distribución de las solicitaciones entre todos los elementos y reduce los esfuerzos internos de cada elemento. Además, de los resultados de deformaciones del modelo en elementos finitos se puede concluir que los muros cumplen con el límite de deflexión de la NSR-10, ya que se obtuvo un IFL de 0,4.

A partir de los resultados obtenidos, se logró demostrar que las viviendas construidas con la modulación propuesta pueden brindar la seguridad a los ocupantes ante cargas verticales teniendo en cuenta los requerimientos del Título B de la norma de construcción sismo resistente de Colombia (NSR-10). El análisis estructural se hizo teniendo en cuenta el Título A de la NSR-10, a pesar que la NSR-10 no cuenta con un capítulo exclusivo para el análisis de sistemas estructurales no convencionales. Sin embargo, en el capítulo A.3.1.7 se permite el diseño de los sistemas estructurales de resistencia sísmica prefabricados mediante un coeficiente de capacidad de disipación de energía R_0 igual a 1,5. Por tal motivo, para el diseño de la estructura de esta investigación se trabajó con un factor de R_0 igual a 1,0 para tener mayores exigencias sísmicas sobre los elementos generando un mayor factor de seguridad [14].

Por otro lado, existe una incertidumbre del comportamiento real de los muros MPET sometidos ante cargas sísmicas laterales, por esta razón, se recomienda como trabajos futuros la evaluación de los MPET mediante ensayos cíclicos o pseudodinámicos.

Con base en los resultados obtenidos en esta fase de estudios y diseños, se propone la metodología de construcción similar a una estructura de mampostería confinada como se describe en el Título E de la NSR-10 [20], realizando el reemplazo de los bloques de mampostería por bloques conformados por botellas PET rellenas

de arena. Para los elementos de confinamiento, se propone ubicar la varilla de acero de refuerzo en el espacio existente de las cuatro botellas y rellenarlo con concreto.

Mediante esta investigación se presenta un sistema constructivo de bajo costo que puede ser implementado en viviendas de interés social (VIS), ya que, al ser una vivienda de bajo costo y basada en recursos energéticos renovables [21], permite una mayor oportunidad de alcance para las poblaciones de escasos ingresos.

Agradecimientos

Se agradece a la Universidad Santo Tomás por financiar el proyecto mediante la convocatoria Fodein Multicampus 2022. Así como también, a los estudiantes y personal de los laboratorios que estuvieron atentos para colaborar con la toma de datos.

Referencias

- [1] Aquae Fundación, “¿Cuál es el tiempo de degradación de los residuos inorgánicos?”, 26 ago 2021. [En línea]. Disponible en: [https://www.fundacionaquae.org/wiki/cuanto-tiempo-tardan-degradarse-desechos/#:~:text=En%20concreto%2C%2010%20a%C3%B1os](https://www.fundacionaquae.org/wiki/cuanto-tiempo-tardan-degradarse-desechos/#:~:text=En%20concreto%2C%2010%20a%C3%B1os.). [Último acceso: 14 jul 2022].
- [2] D. Achilias, E. Antonakou, C. Roupakias, P. Megalokonomos Y A. Lappas, “Recycling techniques of polyolefins from plastic wastes”, *Global NEST Journal*, vol. 10, pp. 114-122, 2008.
- [3] M. Planelles, “Casi la mitad de la población mundial es ‘altamente vulnerable’ a un cambio climático que ha causado ya daños generalizados”, 28 feb 2022. [En línea]. Disponible en: <https://elpais.com/clima-y-medio-ambiente/2022-02-28/casi-la-mitad-de-la-poblacion-mundial-es-altamente-vulnerable-a-un-cambio-climatico-que-ha-causado-ya-danos-generalizados.html>. [Último acceso: 15 jul 2022].
- [4] F. A. Espinosa Guzmán, “Caracterización de botellas PET para su uso como elementos constructivos de muros de carga”, tesis de maestría, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente, 2016.
- [5] Naciones Unidas, “La ONU lucha por mantener los océanos limpios de plásticos”, *Noticias ONU*, 12 may 2017. [En línea]. Disponible en: <https://news.un.org/es/story/2017/05/1378771>. [Último acceso: 17 jul 2022].

- [6] A. Bio-Cosmetics, "Contaminantes plásticos, ¿cómo afectan a nuestro organismo y al medio ambiente?", *Belleza Natural*, 03 may 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.amapola-bio.com/contaminantes-plasticos-como-afectan-a-nuestro-organismo-y-al-medio-ambiente/?cli_action=1660495432.054. [Último acceso: 18 jul 2022].
- [7] Organización Mundial de la Salud, "Medio ambiente y determinantes sociales de la salud", 14 ago 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.paho.org/es/temas/determinantes-ambientales-salud>. [Último acceso: 20 ago 2021].
- [8] D. Ruiz Valencia, C. López Pérez, E. Cortés y A. Froese, "Nuevas alternativas en la construcción: botellas PET con relleno de tierra", *Apunt. Rev. Estud. sobre Patrim. Cult.*, vol. 25, n.º 2, pp. 292-303, 2012.
- [9] Departamento Administrativo Nacional de Estadística, "Boletín técnico. Déficit habitacional", Bogotá, 2021.
- [10] H. D. Rincón Figueroa, "Uso de materiales no convencionales en la elaboración de concretos", tesis de pregrado, Universidad Santo Tomás, 2020.
- [11] K. Madej, "Earthships made from old tires and tin cans", 28 ago 2021. [En línea]. Disponible en: <https://medium.com/transformation-pending/amazing-green-citadels-made-from-old-tires-and-tin-cans-1d680801c6be>. [Último acceso: 19 jul 2022].
- [12] F. A. Argüello Rueda y M. L. Castellanos Salazar, "Prototipo de vivienda de bajos recursos con material reciclado (modelación SAP, caracterización de los materiales y animación virtual)", tesis de pregrado, Universidad Católica de Colombia, Bogotá D.C., 2015, pp. 14.
- [13] C. A. Damiani Lazo, S. M. Cáceres Larico y A. G. Mamani Flores, "Concrete bricks with recycled rubber fibers: An alternative material for social housing", *Ingeniería Solidaria*, vol. 17, n.º 3, pp. 3-10, 2021. doi: <https://doi.org/10.16925/2357-6014.2021.03.01>
- [14] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, "Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR10 Título A", Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Bogotá D.C., 2010, pp. 1.
- [15] M. Oyinlola *et al.*, "Bottle house: A case study of transdisciplinary research for tackling global challenges", *Habitat International*, vol. 79, pp. 18-29, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2018.07.007>
- [16] P. Paihte, A. C. Lalngaihawma y G. Saini, "Recycled aggregate filled waste plastic bottles as a replacement of bricks", *Materialstoday: Proceedings*, vol. 15, n.º 3, pp. 663-668, 2019.

- 20 Evaluación numérica de viviendas ecoamigables conformadas por botellas de plástico rellenas de arena y reforzadas con acero corrugado
- [17] M. Mokhtar *et al.*, "Application of plastic bottle as a wall structure for green house", *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 11, n.º 12, pp. 7617-7621, 2016.
- [18] J. Zambrano Nájera, V. Delgado, J. J. Vélez Upegui, "Short-term temperature variability in a tropical Andean city Manizales, Colombia", *Rev. Vínculos*, vol. 17, n.º 2, pp. 129-139, 2020. doi: <https://doi.org/10.14483/2322939X.17091>
- [19] J. Taaffe, S. O'Sullivan, M. Ekhlasur Rahman y V. Pakrashi, "Experimental characterisation of Polyethylene Terephthalate (PET) bottle Eco-bricks", *Materials & Design*, vol. 60, pp. 50-56, 2014. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.03.045>
- [20] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, "Reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR10 Título E", Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Bogotá, 2010.
- [21] Y. U. López Castrillón y F. A. Gaviria Cataño, "Metodología y evaluación de recursos energéticos renovables: implementación de microrredes aisladas", *Vis. Electron.*, vol. 12, n.º 2, pp. 162-172, dic. 2018. doi: <https://doi.org/10.14483/22484728.14260>