

Evaluación del desempeño de elementos estructurales prefabricados a partir de residuos termoplásticos del sector agroindustrial

Andrés Fernando Guzmán-Guerrero¹

Karla Andrea Parada-Rocha²

Carlos Andrés Parada-Rocha³

Eliu Pineda-Argel⁴

Resumen

La presente investigación evalúa el desempeño de elementos y sistemas estructurales prefabricados, conformados a partir de la mezcla de polietilenos reciclados de alta y de baja densidad, modificados con adiciones de acrilonitrilo butadieno estireno y polietileno clorado, para el mejoramiento de sus propiedades físicas y químicas. Para ello, se recopila y compara información asociada a las propiedades mecánicas y químicas del material, información con la cual se realiza optimizaciones de los parámetros geométricos a través de modelación computacional basada en el método de los elementos finitos. Se ejecuta ensayos de tracción y compresión sobre probetas constituidas de RHDPE y RLDPE no alterado; en la modelación se encuentra que la incorporación de ABS y CPE del 50.0 % y 40.0 % por peso de RHDPE, respectivamente, puede proporcionar rigidez, resistencia a ataques químicos y estabilidad a altas temperaturas. Con los resultados de modelación se pretende lograr comportamientos mecánicos muy similares a los de elementos comerciales y sus conexiones, capaces de soportar las solicitaciones a las que pueden

¹Doctor. Profesor del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Norte. Correo electrónico: faguzman@uninorte.edu.co

²Estudiante de Maestría en Ingeniería Civil, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Norte. Ingeniera Civil. Correo electrónico: paradak@uninorte.edu.co

³Estudiante de Maestría en Ingeniería Civil, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Norte. Correo electrónico: cparadaa@uninorte.edu.co

⁴Estudiante de Ingeniería Civil, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Norte. Correo electrónico: eargel@uninorte.edu.co

estar sometidos diferentes tipos de elementos estructurales, determinando así la viabilidad de su implementación para edificaciones bajas.

Palabras clave: elementos estructurales; FEM; propiedades mecánicas; RHDPE; RLDPE; durabilidad.

Evaluation of the performance of prefabricated structural elements from thermoplastic waste from the agro-industrial sector

Abstract

This research evaluates the performance of prefabricated structural elements and systems, formed from the mixture of recycled high and low-density polyethylene, modified with additions of acrylonitrile butadiene styrene and chlorinated polyethylene, for the improvement of their physical and chemical properties. For this, information associated with the mechanical and chemical properties of the material is collected and compared, information with which optimizations of the geometric parameters are made through computational modeling based on the finite element method. Tensile and compression tests are performed on specimens made of RHDPE and unaltered RLDPE; In the modeling, it is found that the incorporation of ABS and CPE of 50.0% and 40.0% by weight of RHDPE, respectively, can provide rigidity, resistance to chemical attack and stability at high temperatures. The modeling results are intended to achieve mechanical behaviors very similar to those of commercial elements and their connections, capable of withstanding the stresses to which different types of structural elements may be subjected, thus determining the feasibility of their implementation for low buildings.

Keywords: structural elements; FEM; mechanical properties; RHDPE; RLDPE; durability.

Avaliação do desempenho de elementos estruturais pré-fabricados a partir de resíduos termoplásticos do setor agroindustrial

Resumo

Esta pesquisa avalia o desempenho de elementos e sistemas estruturais pré-fabricados, formados a partir da mistura de polietilenos de alta e baixa densidade reciclados, modificados com adições de acrilonitrila butadieno estireno e polietileno clorado, para a melhoria de suas propriedades físicas e químicas. Para isso, são coletadas e comparadas informações associadas às propriedades mecânicas e químicas do material, informações com as quais são feitas otimizações dos parâmetros geométricos por meio de modelagem computacional baseada no método dos elementos finitos. Os testes de tração e compressão são realizados em amostras feitas de RHDPE e RLDPE inalterado; na modelagem, verifica-se que a incorporação de ABS e CPE de 50,0% e 40,0% em peso de RHDPE, respectivamente; pode proporcionar rigidez, resistência ao ataque químico e estabilidade em altas temperaturas. Os resultados da modelagem pretendem obter comportamentos mecânicos muito semelhantes aos dos elementos comerciais e suas ligações, capazes de suportar os esforços a que podem ser submetidos os diferentes tipos de elementos estruturais, determinando assim a viabilidade da sua implementação em edifícios baixos.

Palavras-chave: elementos estruturais; FEM; propriedades mecânicas; RHDPE; RLDPE; durabilidade.

INTRODUCCIÓN

El concreto como material constructivo genera contaminación, debido a las materias primas que lo componen, desde la fabricación del cemento portland (debido a las altas emisiones de CO₂ durante el proceso) hasta la explotación de suelos para la obtención de agregados pétreos (Tayeh et al., 2019). Por lo anterior, diversas investigaciones apuntan sus esfuerzos en encontrar materiales constructivos que permitan reemplazarlo parcial o totalmente. El plástico, uno de los principales contaminantes a nivel mundial, es un residuo reutilizable que se ha escogido como sustituto del concreto como material estructural. Su alto nivel de contaminación radica en que el plástico, aunque sea derivado de materias orgánicas naturales (petróleo o carbón), emite elevadas cantidades de CO₂ a la atmósfera durante su proceso de elaboración. La inadecuada disposición de este material representa un serio problema ambiental debido a su bajo reúso/reciclaje (Al-Tayeb et al., 2019).

A la fecha se han registrado patentes internacionales en las que con plásticos reciclados se han manifestado alternativas para conformar paneles tipo cajón anclados a una losa y que se rellenan posteriormente con concreto para formar elementos con capacidad estructural (La Borde 1976; Sawalha y El-Hamouz, 2010; Zen 1998). Sin embargo, la presente investigación se centra en no necesitar el uso de concreto para darle propiedades resistentes a los perfiles, se trata de buscar las formas y las dosificaciones necesarias, por medio de modelaciones computacionales, para que los termoplásticos sean capaces de soportar diferentes solicitaciones de carga. De esta manera, se puede lograr que cuenten con un desempeño mecánico apropiado, debido a su bajo peso relativo al del concreto y con formas o secciones que potencialicen su resistencia. Así, se obtienen perfiles con rigidez y capacidad para soportar cargas a flexión, compresión y tracción, y con secciones transversales adecuadas para cada modalidad de solicitación.

Los residuos indirectos agroindustriales plásticos (RI), para el caso de HDPE (*High Density Polyethylene*) y LDPE (*Low Density Polyethylene*), presentan un excelente comportamiento ante la corrosión y agentes ambientales (Kalpakjian y Schmid 2002), lo que resultaría provechoso en aplicaciones costeras y en ambientes agresivos, haciendo el mantenimiento prácticamente nulo. Al considerar geometrías y composiciones químicas termoplásticas adecuadas, es posible alcanzar una excelente resistencia mecánica (e.g. tracción, compresión, flexión, corte e impacto), lo que justificaría su utilización en sistemas estructurales (Miravete 1997). Estos materiales también presentan una elevada capacidad de moldeo en grandes piezas, en contraposición a las dificultades que se tienen con los materiales tradicionales. Asimismo, Miravete (1997) indica que son autolimpiables por la lluvia y pueden ser resistentes al fuego si se incluyen las resinas y aditivos correctos en la manufactura; además, tienen grandes propiedades de aislamiento térmico y facilidad de pigmentación.

La presente investigación se enfoca en evaluar las características de los residuos termoplásticos agroindustriales provenientes de la región Caribe, para su incorporación

como constituyentes de elementos prefabricados de construcción (columnas, vigas, sistema de losa), en viviendas de uno y dos pisos en el departamento del Atlántico. Asimismo, podría ser una propuesta de reutilización enfocada hacia la sostenibilidad ambiental, puesto que, al lograr implementar los elementos estructurales de RI plásticos como constituyentes de un nuevo método constructivo, se disminuiría en gran medida el CO₂ producido en el ámbito constructivo. Existiría entonces la posibilidad de contar con viviendas totalmente habitables, sostenibles, autoconstruibles⁵, con buenos acabados y que cumplan con las normas de construcción y de especificación de materiales, como el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR -10 (Asociación Colombiana de Ingeniería Sistemática [AIS], 2010), ASTM D-695-15 (ASTM International 2019), ASTM D-732 (ASTM International 2017a), entre otras normas.

Metodología

La metodología desarrollada es de tipo cuantitativa e incluye ensayos de tensión, compresión y modelaciones de comportamientos físicos, mecánicos y químicos, a secciones termoplásticas, que se propondrán para prototipado en una etapa posterior. Lo anterior, con el fin de evaluar si es viable construir elementos estructurales para viviendas compuestas en su totalidad por estos materiales y que no requieran de aceros, elementos de mampostería o concretos (productos tradicionales usados para la construcción).

Esta investigación se lleva a cabo en cinco fases:

FASE I. Actividades preliminares

Inicialmente se realizó la compilación de la información existente con respecto a las propiedades físicas, mecánicas y químicas de los RHDPE y RLDPE, y de los métodos y materiales constructivos usados actualmente. También se recopilieron muestras constituidas por 50 % HDPE y 50 % LDPE, provenientes de empresas colombianas que operan con productos reciclables del sector agroindustrial, en una cantidad tal que permitió hacer un número estimado de ensayos estadísticamente representativos.

FASE II. Caracterización y evaluación experimental del desempeño estructural

Posteriormente se realizó el corte del polietileno seleccionado en la fase I, con la finalidad de dimensionar las probetas para el ensayo de tracción. Las medidas de los especímenes se muestran en la Figura 1 y fueron obtenidas mediante la norma ASTM D638-14 (ASTM International, 2014), estándar asociado al ensayo de tracción de materiales plásticos. El corte se efectuó en el laboratorio de diseño industrial de la Universidad del Norte, para ello se utilizó una sierra sinfín de cortar madera (Figura 2a);

⁵Autoconstruibles hace referencia a que los usuarios puedan construir por cuenta propia.

para mayor precisión en el corte se imprimieron las dimensiones a escala real (Figura 2b y c) y se materializaron 5 probetas para la realización de los ensayos a tracción (Figura 2d).

Figura 1

Dimensiones probetas tracción (dimensiones en mm)

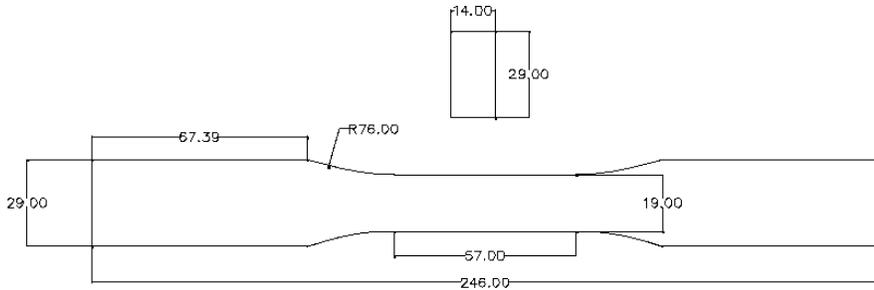


Figura 2

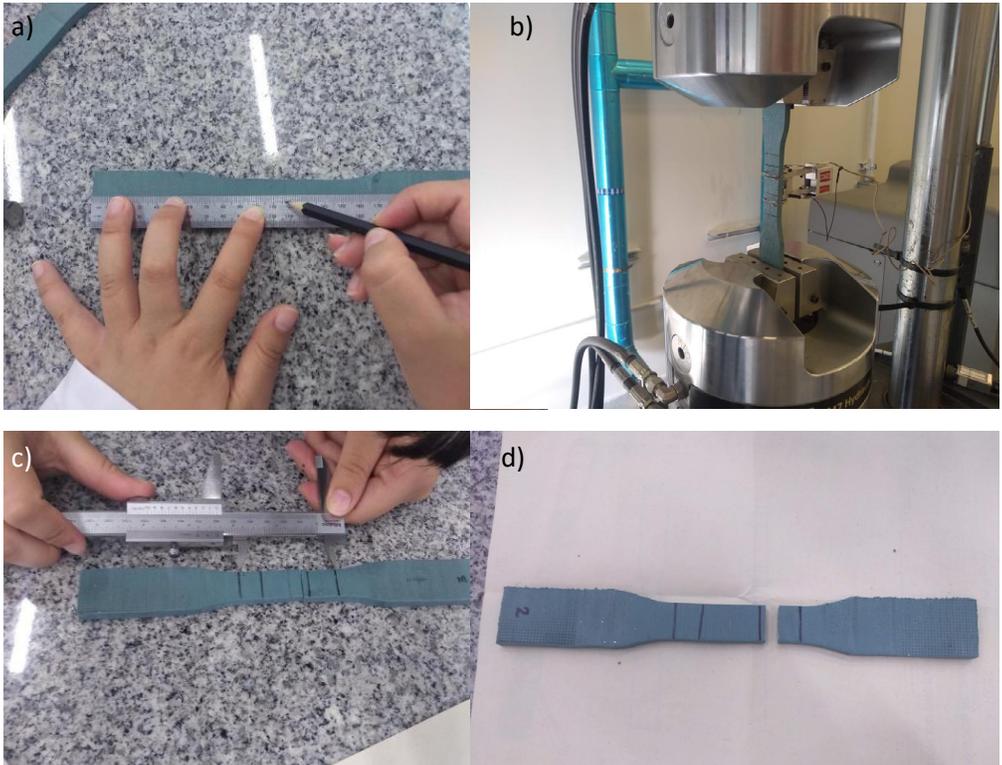
a) Sierra sinfín para corte de las probetas. b y c) Corte de probetas. d) Acabado final de las probetas



Dentro de la zona de falla de cada muestra se marcaron las respectivas líneas guías (Figura 3a); se midió la distancia entre ellas y el espesor antes y después del ensayo, con la finalidad de conocer la elongación del material e identificar el tipo de falla.

Figura 3

a) Marcación de líneas guías dentro de la zona de falla. b) Probeta con extensores para el inicio del ensayo. c) Medición de la elongación. d) Probeta después de ser ensayada

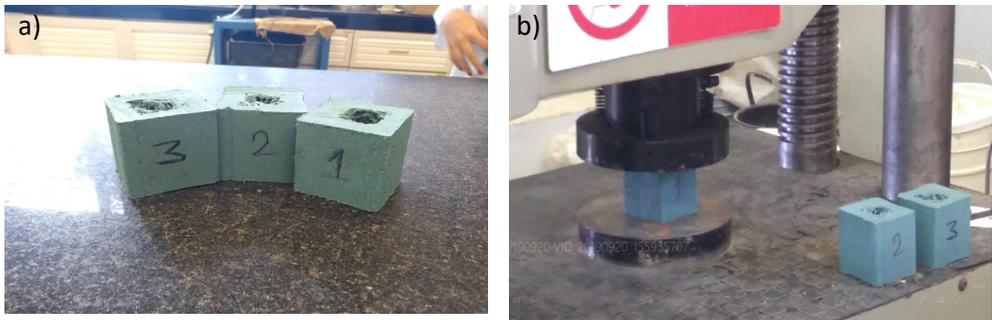


Se realizaron también pruebas de compresión al material recolectado en la Fase I, con base en la norma NTC 673 (2010), ya que, a pesar de ser un estándar de ensayo para concretos, permite tener una estimación de resistencia de este tipo de probetas. Para ello se tomó un listón de 5 cm x 5 cm x 100 cm, con la ayuda de una sierra se cortó para formar tres cubos de 5 cm; se observó que el material presenta una considerable porosidad en el centro, tal como se muestra en la Figura 4a. Los cubos fueron sometidos a compresión en la máquina universal (Figura 4b) y durante la ejecución del ensayo, los especímenes no llegaron a la falla. or seguridad se decidió suspender

la prueba en cargas cercanas a los 76.61 kN, debido a que las muestras presentaron comportamiento retráctil y se corría el riesgo de ocasionar daños en la máquina o desalineamiento de la muestra.

Figura 4

a) *Probetas para ensayar a compresión.* b) *Ensayo a compresión en la máquina*



Con la información recopilada de las propiedades físicas y mecánicas del polietileno en las Fases I y II, se efectúan comparaciones con modelos computacionales basadas en el método de los elementos finitos, que permitan identificar puntos críticos, así como también modelar las adiciones y las cantidades necesarias para mejorar las propiedades físico-mecánicas del material en estudio.

FASE III. Comportamiento mecánico modelado y optimización de secciones

Haciendo uso de los conceptos del método de los elementos finitos, en el software COMSOL Multiphysics se realizan cuatro modelos, teniendo en cuenta las adiciones que se harán al material para mejorar las falencias ya conocidas por literatura (e.g. baja resistencia al fuego, a la tracción, alta flexibilidad y poca durabilidad) (Satya y Sreekanth 2020; La Borde 1976).

Modelo 1

El primer modelo corresponde a una simulación de las propiedades térmicas y mecánicas del material ensayado en la fase II. Para la evaluación del comportamiento térmico se contempla una placa de 100 mm x 100 mm x 20 mm; teniendo en cuenta que, el material ensayado corresponde a una dosificación de 50 % HDPE y 50 % LDPE. El material que constituye la probeta se modeló como un material compuesto, laminado en n capas. Se usaron temperaturas de 60 °C y 25 °C en dos caras opuestas de la placa, con la finalidad de estudiar la conductividad del material compuesto. Con fines comparativos, se alternaron las capas de tal forma que llegasen primero los 60 °C al HDPE y los 25 °C al LDPE, y viceversa. Una vez finalizada la modelación térmica, se procedió a la simulación mecánica, para esto, se conformó una probeta cilíndrica

con la misma distribución de las capas a la descrita anteriormente. Se simularon las mismas condiciones de apoyo a las que fueron sometidas las probetas de la fase II, en la máquina de tracción; seguidamente, se aplicó una carga monotónica hasta el valor límite del material. Los resultados se comparan con los datos experimentales con fines de validación.

Modelo 2

Adicional a los componentes del material del modelo 1, se tendrán adiciones de ABS y CPE (como mejoradores de propiedades de durabilidad y de temperatura), que serán estudiadas como trabajo futuro.

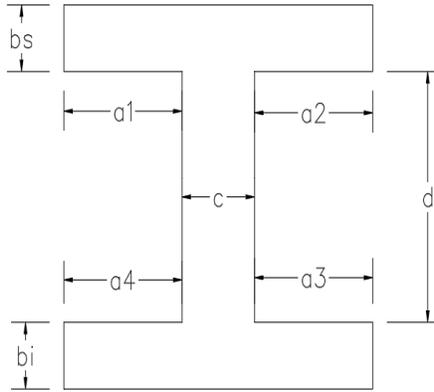
Debido a que no hay literatura que indique las propiedades mecánicas y térmicas de este material así constituido, se pretende modelar una tubería cilíndrica formada por un material laminar similar al descrito en el modelo 1. De acuerdo con investigaciones previas, la reducción de la llama se logra cuando la adición de ABS y CPE es de hasta un 50 wt % (Yan et al., 2014; Cheng et al., 2015); por tanto, las capas del modelo estarán dispuestas de 10 % de CPE, 30 % de ABS, 30 % de HDPE y 30 % de LDPE. El CPE se ubicará en las caras externas, debido a que proporciona resistencia a los rayos ultravioleta (Li et al., 2020). La tubería cilíndrica, así constituida, será sometida en COMSOL a tracción pura, con la finalidad de trazar la curva esfuerzo vs. deformación, obteniendo así el módulo de Young y la relación de Poisson del “nuevo material”, datos de entrada para un tercer modelo.

Modelo 3

El tercer modelo consiste en buscar el perfil más adecuado ante una determinada sollicitación de carga; para ello, en el asistente de modelos de COMSOL se elige dimensión de espacio 3D, usando la interfaz física de mecánica de sólidos. Como se desea conocer el comportamiento del material cuando es sometido a carga de compresión, se añade un estudio de pandeo lineal y un estudio vacío que se usará para la optimización. Posteriormente, se creó en el software el nuevo material con los resultados obtenidos en el segundo modelo y se definieron los parámetros de dimensiones de sección transversal, esfuerzo máximo que soportará el material, carga y longitud de la columna. En un plano de trabajo se procede a crear la geometría plana de la sección que posteriormente fue extruida para formar el elemento; se usó un polígono definido por los parámetros a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , b_i , b_s , d y c (ver Figura 5) y se extruyó.

Figura 5

Polígono de la sección usado para las iteraciones en COMSOL

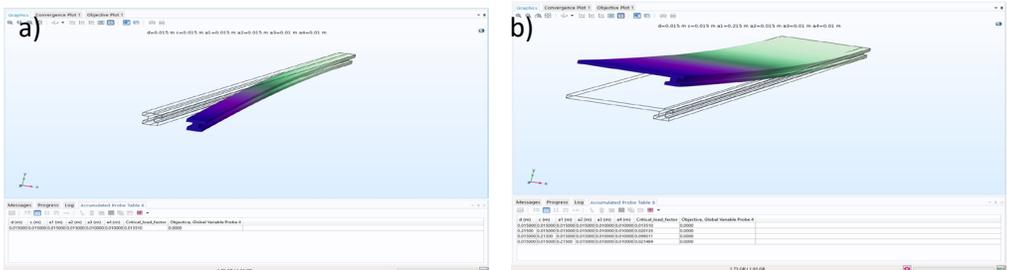


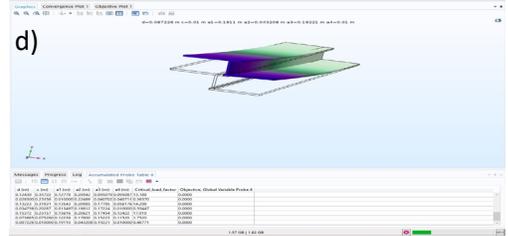
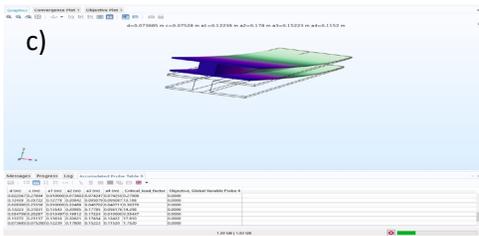
Seguidamente, se definió el dominio de integración, que en este caso es todo el objeto, debido a que se requiere modificar toda la sección para luego optimizarla; se selecciona el dominio que se minimizará y se dan las condiciones de cargas y de apoyos. Finalmente, se procede a la parte de la optimización, la cual se ejecutó por el método COBYLA con tolerancia de optimización de 0.001; el método minimiza la masa del elemento y la carga crítica en la que se presentará la falla. La finalidad del polígono de la Figura 5 consiste en que el software active o desactive los tramos del polígono que serán necesarios para soportar la sollicitación de carga a compresión.

En la Figura 6 se puede observar las iteraciones realizadas por el modelo a la geometría de la sección. El software otorga como resultado un listado de geometrías que cumplen con la sollicitación; se deben escoger del listado la sección óptima, teniendo en cuenta el requisito de masa y factor de carga crítica. La sección escogida deberá ser ajustada de tal forma que sea constructivamente viable y preferiblemente simétrica.

Figura 6

Ilustración de optimizaciones de las secciones a compresión





Modelo 4

Con la finalidad de conocer el comportamiento térmico del nuevo material, como trabajo futuro, se pretende crear un cuarto modelo, en el que se simularán exposiciones a altas temperaturas y gradientes térmicos; los resultados serán comparados con los obtenidos para el material no modificado en el modelo 1.

Una vez realizadas todas las pruebas y modelaciones, se procederá a comparar el comportamiento del material con los convencionales, a fin de determinar si posee las características requeridas para ser usado como material constituyente de elementos estructurales como vigas, columnas, muros y losas. A pesar de no tener la presente investigación un enfoque profundo de durabilidad, se documentaron los ensayos que se deben considerar para evaluar el comportamiento del polietileno tras la exposición a gradientes de temperatura, intemperie y ambientes, que normalmente ocasionarían patologías en concretos y aceros.

FASE IV. Desarrollo y prueba

Si el proyecto arroja resultados satisfactorios, como trabajo futuro se estudiará la viabilidad normativa de la construcción con este tipo de secciones, con énfasis en la incorporación de las propiedades mecánicas estimadas para conformar un modelo computacional, el cual será sometido a cargas muertas, vivas, eólicas y sísmicas, para estimar la eficiencia y cumplimiento normativo del sistema. Se diseñará un prototipo de estructura de vivienda unifamiliar, teniendo como resultado un conjunto de planos de distribución/organización de los elementos plásticos, logrando crear así un sistema de viviendas dignas, manoportables, sostenibles, durables y de calidad.

FASE V. Evaluación del impacto ambiental

Finalmente, se estimarán los niveles de CO₂ que se liberan al fabricar las secciones, para proceder a comparar los beneficios en métodos y tiempos de la construcción con el sistema termoplástico respecto al convencional.

Resultados y Análisis

Compresión (componente experimental)

En la Tabla 1 se recopilan los resultados de la prueba a compresión de los cubos, obteniendo una resistencia promedio de 18.74 MPa. Se tomó como referencia una densidad de concreto de 2.400 kg/m³ y una de 970 kg/m³ para el material en estudio, de esta forma se obtiene que para un mismo volumen el material presenta una eficiencia de carga soportada respecto al peso propio igual a 2.47 veces la del concreto. Los especímenes tuvieron un comportamiento elástico (retráctil), presentando un excelente comportamiento a compresión, por lo tanto, se recomienda reducir lo máximo posible la porosidad del material para garantizar un mejor comportamiento estructural.

Tabla 1

Resistencias a compresión para cada cubo

Nº. Muestra	Carga (kN)	Área (mm ²)	Resistencia a compresión (MPa)
1	76.82	4080.0	18.8
2	76.56	4116.0	18.6
3	76.44	4068.0	18.8

Tracción (componente experimental)

A cada probeta ensayada a tracción se le midió la distancia entre las líneas guías, los anchos y los espesores, antes y después de la prueba (ver Tabla 2). Los datos de la muestra 5 no se tuvieron en cuenta, debido a que la falla se presentó fuera de la zona indicada. La falla fuera de la zona en la probeta No. 5 se dio por la presencia de material orgánico en la mezcla. Entre los datos más representativos arrojados por la máquina de ensayo, se encuentran la carga axial aplicada sobre el espécimen y el desplazamiento medido por el extensómetro.

Tabla 2*Geometría de cada espécimen a tracción, en la zona de falla*

Datos de geometría del espécimen				
Espécimen No.	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Espesor final (mm)	Ancho final (mm)
1	6.7	19.4	6.2	18.95
	6.5	19.2	6.2	19.95
	6.3	19		
	6.2	19.1		
	6.2	19.1		
2	6.38	19.16	6.2	19.45
	5.9	19	5.6	19.1
	5.7	19.1	5.5	19
	5.8	19.25		
	6.1	19.1		
3	6.1	18.9		
	5.92	19.07	5.55	19.05
	6.3	18.95	6.3	18.8
	5.7	18.85	6.2	18.8
	6.35	19		
4	6.3	18.95		
	6.4	18.9		
	6.21	18.93	6.25	18.8
	6.5	19.7	6.3	19.4
	6.5	19.3	6.2	19.6
4	6.45	19.4		
	6.45	19.7		
	6.15	19.6		
	6.41	19.54	6.25	19.5

Los resultados para cada espécimen se muestran en la Tabla 3. Para determinar el esfuerzo en cada instante de tiempo es necesario conocer el área inicial de cada probeta, la cual se estimó por medio de la Ecuación 1.

$$A_o = e_{prom} \cdot a_{prom} \quad (1)$$

Donde:

A_o : área inicial de cada probeta [mm²]

e_{prom} : espesor promedio de cada probeta [mm]

a_{prom} : ancho promedio de cada probeta [mm]

Para conocer numéricamente si el material tuvo un comportamiento frágil o dúctil, se determina el porcentaje de elongación y el porcentaje de reducción de área (Ecuación 2).

$$\% \text{ elongación} = \frac{l_f - l_o}{l_o} \cdot 100 \quad (2)$$

Donde:

l_f : longitud final del espécimen, medida de guía a guía [mm]

l_o : longitud inicial del espécimen, medida de guía a guía [mm]

$$\% \text{ reducción de área} = \frac{A_o - A_f}{A_o} \cdot 100 \quad (3)$$

Donde:

A_o : área inicial del espécimen [mm²]

A_f : área final del espécimen [mm²]

Tabla 3

Porcentaje de elongación y de reducción de área de cada espécimen a tracción

Parámetro	Espécimen 1	Espécimen 2	Espécimen 3	Espécimen 4
lo [mm]	57	57	57	57
lf [mm]	57.4	58	58	58
Ao (mm ²)	122	113	118	125
Af (mm ²)	121	106	118	122
% elongación	0.70 %	1.75 %	1.75 %	1.75 %
% reducción de área	1.35 %	6.35 %	0.05 %	2.70 %

Los resultados de esfuerzo deformación para cada espécimen se muestran en la Figura 7, en la cual se puede evidenciar el comportamiento frágil del polietileno ensayado, pues no hay aplanamiento de la curva, alcanzando un esfuerzo máximo promedio de 18 MPa. El comportamiento frágil también es evidenciable en la Tabla 3, donde se muestra un bajo porcentaje de elongación y reducción de área tras la ruptura. Con el objetivo de obtener el módulo de elasticidad elástico y conocer el comportamiento general del material al ser sometido a tensión pura, se promedian los esfuerzos y deformaciones del grupo de probetas, de lo cual se obtuvo que el módulo de elasticidad en la zona elástica del material es de 870.28 MPa, tal como se muestra en la ecuación del tramo lineal de la Figura 8.

Figura 7

Curva esfuerzo deformación de cada espécimen

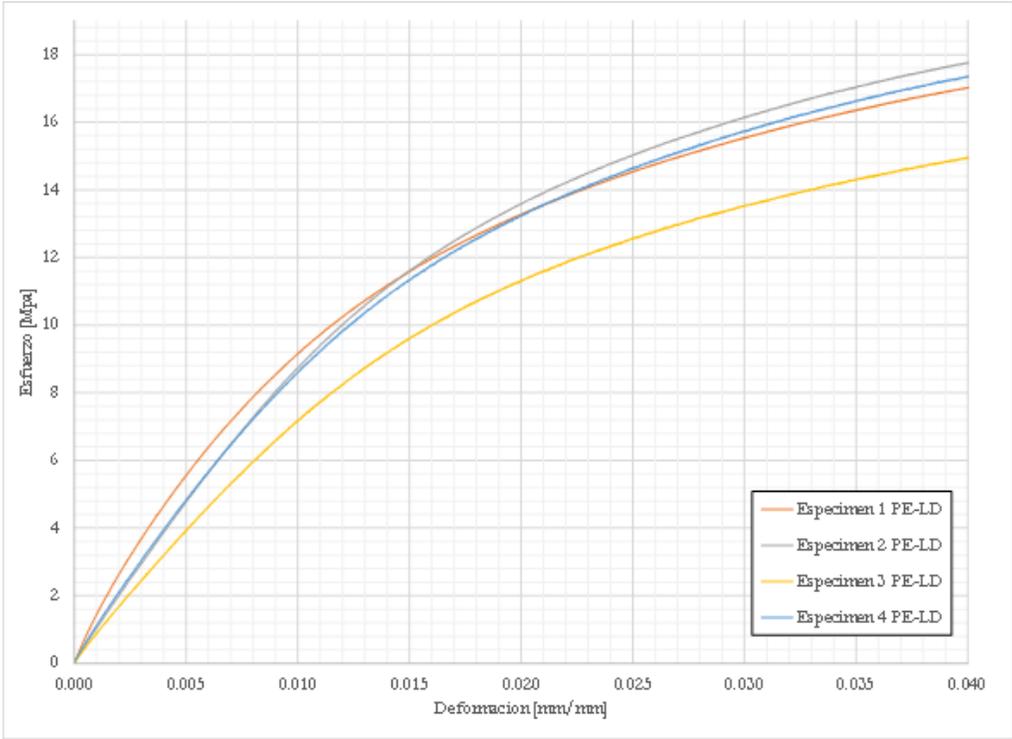
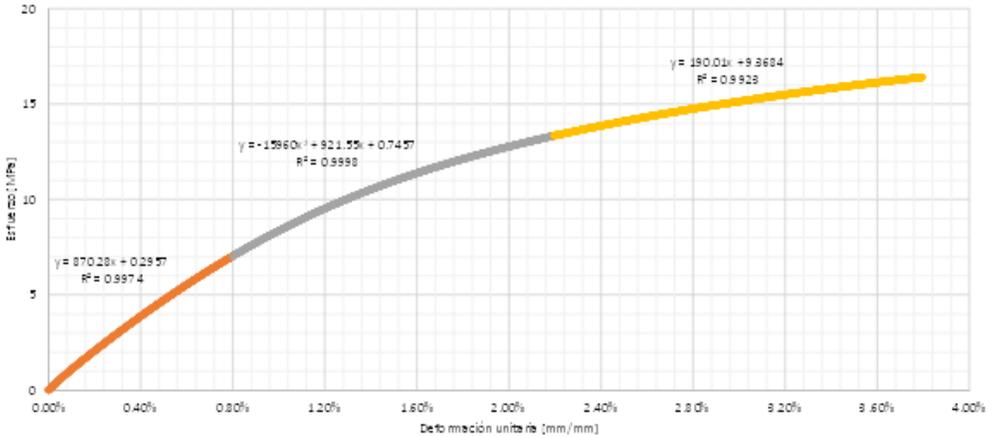


Figura 8

Curva esfuerzo deformación ($\sigma - \epsilon$)



Comportamiento térmico HDPE+LDPE

En la Figura 9 se observa la transferencia de temperatura en el interior del material compuesto, al someterse a gradientes de 60 °C en la cara de HDPE y 25 °C en la cara de LDPE (Figura 9a). De la modelación se puede inferir que el material tiene capacidad de aislamiento térmico, es decir, que es capaz de absorber energía calorífica. La anterior hipótesis es demostrable si se realiza una gráfica de temperatura vs. espesor, notándose una variación lineal con pendiente negativa, la cual es un indicativo de la baja conductividad térmica del material (Figura 10). En la Figura 10 se evidencia también la presencia de dos pendientes que revelan el aporte que tiene cada material (HDPE y LDPE) en la conductividad del material compuesto. Con la finalidad de visualizar los cambios de pendiente, la del LDPE se desfasó hasta el punto de máxima temperatura, observando que tiene menor inclinación respecto al HDPE, ya que tiene mayor conductividad. Finalmente, en la Figura 9b se observa que la posición individual de los polímeros no interfiere en el comportamiento térmico del material compuesto.

Figura 9

a) Distribución de temperaturas en una placa conformada por láminas intercaladas de HDPE (izquierda a 60°C) y LDPE (derecha 25°C). b) Distribución de temperaturas en una placa conformada por láminas intercaladas de LDPE (izquierda a 60°C) y HDPE (derecha 25°C)

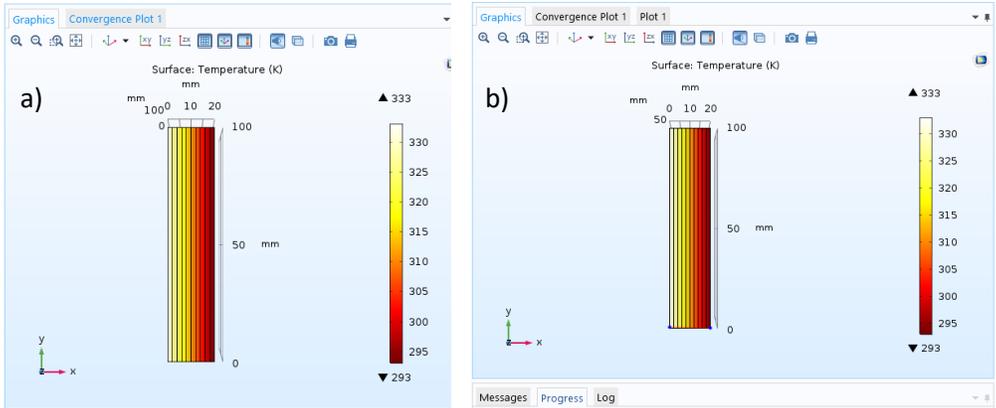
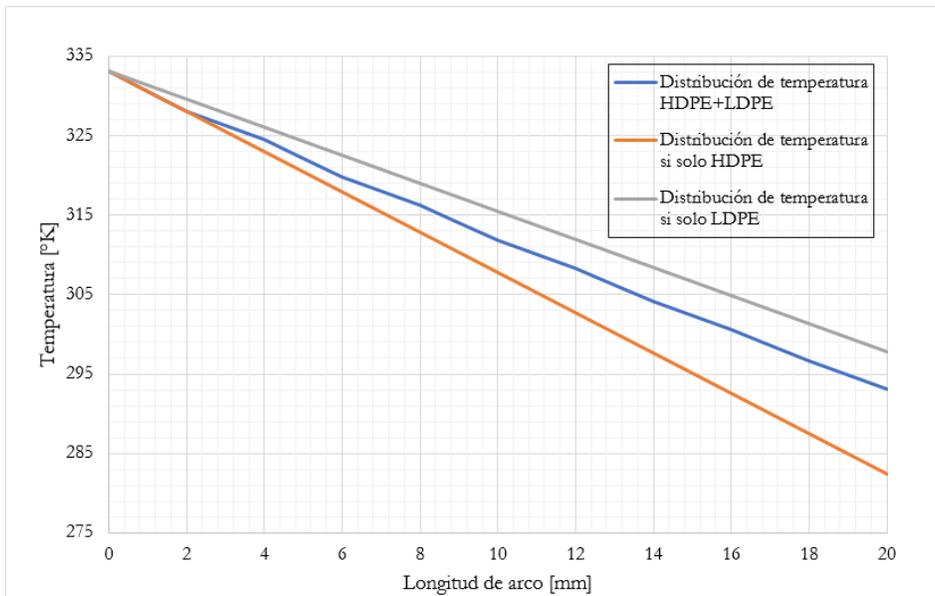


Figura 10

Distribución de temperaturas y cambio de pendientes cuando le llegan 60 °C a HDPE y 25 °C a LDPE



Conclusiones

Teniendo en cuenta los resultados, se concluye que el material conformado por 50 % HDPE y 50 % LDPE posee una alta eficiencia carga/ peso a compresión, igual a 2.47 veces la del concreto, si se compara con uno de 2400 kg/m³. Asimismo, el material a tracción presenta el comportamiento lineal-elástico, que tienen materiales como aceros y concretos; alcanzando un esfuerzo máximo promedio de 18 MPa y con un módulo de elasticidad en la zona elástica de 870.28 MPa. El polímero presentó falla frágil, un comportamiento indeseado en elementos estructurales, por ello se está estudiando, a través de modelación computacional, las mejoras proporcionadas por el ABS y el CPE y la optimización de las secciones. Se recomienda garantizar que el polímero esté libre de material orgánico, debido a que se convierten en planos de falla, también, reducir lo máximo posible la porosidad del material para garantizar un mejor comportamiento estructural.

Se debe tener especial cuidado con los resultados arrojados por el modelo 3 desarrollado hasta este punto de la investigación, debido a que, al no estar terminado, se deben escoger en el listado de perfiles que arroja el software la sección más adecuada, teniendo en cuenta el requisito de masa y factor de carga crítica. La sección seleccionada deberá ser ajustada de tal forma que sea constructivamente viable y preferiblemente simétrica.

El material ensayado (50 % HDPE y 50 % LDPE) presenta un buen comportamiento térmico, con capacidad de disipación de energía calorífica. Cada material aporta en la baja conductividad térmica del polímero compuesto y esta propiedad es indiferente de la posición del material en las capas.

Como el material es impermeable, proporcionaría ventajas desde el punto de vista de durabilidad, por impedir el ingreso de agentes que normalmente ocasionarían patologías en aceros y concretos reforzados. Se recomienda realizar los ensayos convencionales de durabilidad ASTM G7-13 (ASTM International, 2013a) para la exposición ambiental atmosférica de materiales no metálicos y ASTM G24-13 (ASTM International, 2013b) para exposiciones a la luz del día filtrada a través del cristal. Asimismo, se debe tener en cuenta las técnicas de acelerado natural para exteriores ASTM G90-17 (ASTM International 2017b) para realizar una meteorización acelerada al aire libre de materiales no metálicos, utilizando la luz solar natural concentrada, y ASTM G7-13 para la exposición ambiental atmosférica en las pruebas de materiales no metálicos.

Referencias

- Al-Tayeb, M., Hanafi, I., Mahmoud, R. & Tayeh. (2019). Effect of partial replacement of sand by plastic waste on impact resistance of concrete: experiment and simulation. *Structures*, 20, 519-526. 10.1016/j.istruc.2019.06.008.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sistémica (AIS). (2010). Reglamento colombiano de construcción sismo resistente, NSR-10. https://www.culturarecreacionydeporte.gov.co/sites/default/files/reglamento_construccion_sismo_resistente.pdf
- ASTM International. (2013a). ASTM G7-13 Practice for Atmospheric Environmental Exposure Testing of Nonmetallic Materials. <https://www.astm.org/Standards/G7.htm>
- ASTM International. (2013b). ASTM G24-13 Practice for Conducting Exposures to Daylight Filtered Through Glass. <https://www.astm.org/Standards/G24.htm>
- ASTM International. (2014). ASTM D638-14 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. <http://www.dept.aoe.vt.edu/~aborgolt/aoe3054/manual/expt5/D638.38935.pdf>
- ASTM International. (2017a). ASTM D732-17 Standard Test Method for Shear Strength of Plastics by Punch Tool. <https://www.astm.org/Standards/D732.htm>
- ASTM International. (2017b). ASTM G90-17 Practice for Performing Accelerated Outdoor Weathering of Nonmetallic Materials Using Concentrated Natural Sunlight. A <https://www.astm.org/Standards/G90.htm>
- ASTM International. (2019). ASTM D695-15 Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. <https://www.astm.org/Standards/D695.htm>
- Cheng, K., Chang, S., Lin, Y. & Wang, C. (2015). Mechanical and flame retardant properties of polylactide composites with hyperbranched polymers. *Composites Science and Technology*, 118(30), 186-192. 10.1016/j.compscitech.2015.09.001.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2010). NTC 673: Concretos. Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto.
- Kalpakjian, S. y Schmid, S. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Pearson Educación.
- La Borde, J. (1976). Snap-on paneling (Patente Estados Unidos No. 3.992.839). Ethyl Corporation. <https://uspto.report/patent/grant/3,992,839>

- Li, Y., Wensheng, W., Zhang, J., Lin, J., Zhou, J., Dong, M., Gan, Y., Seok, I. & Guo, Z. (2020). Effects of chlorinated polyethylene and antimony trioxide on recycled polyvinyl chloride/acryl-butadiene-styrene blends: flame retardancy and mechanical properties. *Polymer*, 190(2).
- Miravete, A. (1997). Materiales compuestos en la construcción: Introducción. *Materiales de construcción*, 47, 247-248.
- Satya, S. & Rama, P. (2020). An experimental study on recycled polypropylene and high-density polyethylene and evaluation of their mechanical properties. *Materials Today: Proceedings*, 27(2), 920-924.
- Sawalha, S. & El-Hamouz, A. (2010). Improvements of the Tensile Properties of Recycled High Density Polyethylene (HDPE) by the Use of Carbonized Olive Solid Waste. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 49(4), 387-393. <https://doi.org/10.1080/03602550903532141>
- Tayeh, B., Mohammed, W., Zeyad, A. & Moruf, Y. (2019). Properties of concrete containing recycled seashells as cement partial replacement: A Review. *Journal of Cleaner Production*, 237(10). 10.1016/j.jclepro.2019.117723.
- Yan, H., Du, X., Zhang, M., Zhang, J., Ma, S. & Xu, B. (2014). Synthesis and characterization of novel organic magnesium salt flame retardant. *Materials Letters*, 134(1), 210-213.
- Zen, V. (1998). Thermoplastic structural system and components therefor and method of making same. <https://patentimages.storage.googleapis.com/ab/7b/af/7c9d23d477e951/OA10218A.pdf>