

PEAD reciclado, reforzado por fibra de vidrio. Aplicación en cubiertas. HDPE fiberglass reinforced. Application on roofs.

Francisco Solis-Campos ^{a,*}, Perla Rafael Santa Ana Lozada ^a

^a Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, Ciudad Universitaria, Av. Universidad 3000, Del. Coyoacán Ciudad de México, C.P. 04510.

Resumen

La gran cantidad de residuos plásticos los hace una fuente de materia prima a través del reciclaje. El polietileno de alta densidad es el segundo plástico más consumido y producido en México y a nivel global. En la presente investigación se generó el diseño de un material compuesto, con matriz de polietileno de alta densidad reciclado, reforzado por fibra de vidrio corta clase E, con el objetivo de producir perfiles estructurales que se utilicen en armaduras para cubiertas ligeras de gran claro. Se ha realizado la caracterización mecánica del material, para conocer las propiedades a tensión y a compresión. También la caracterización física para conocer la densidad y expansión térmica lineal. Así como la caracterización térmica, con el objetivo de conocer los parámetros de producción y estabilidad térmica. Los resultados obtenidos de la caracterización mecánica y física, se introducirán en una herramienta digital para conocer la utilidad del material conforme al análisis y diseño estructural, aplicado a la arquitectura

Palabras Clave: PEAD, reciclaje, fibra de vidrio, cubiertas ligeras, análisis térmicos.

Abstract

A large amount of plastic waste makes it a raw material source through recycling. High-density polyethylene is the second most consumed and produced plastic in Mexico and globally. This research aims to design a composite material with a matrix of recycled high-density polyethylene reinforced by short fiberglass, class E, generated to produce structural profiles used in trusses for light roofs of great span. The mechanical characterization of the material has been carried out to know the properties of compressive and tensile stresses. Furthermore, this new material's density and linear thermal expansion were evaluated to get the best production parameters to achieve thermal stability. The results obtained from the mechanical and physical properties will be statistically presented. These results showed the usefulness of the material according to the analysis and structural design applied to architecture.

Keywords: HDPE, recycling, fiberglass, lightweight roofs, thermal analysis.

1. Introducción

La producción de envases plásticos en México entre el 2020 y el 2022, ha crecido un 15 % (Plastimagen, 2022) con ello la generación de residuos. Se estima que a alrededor del 50% de los plásticos que se producen se destina a aplicaciones de un solo uso, entre 20 y 25% se emplean en la construcción y el resto en la fabricación de otros productos, como electrónicos, muebles y vehículos (Hopewell et al., 2009). A través del reciclaje se pueden utilizar residuos plásticos como materia prima para la construcción a través de la producción industrializada de perfiles estructurales, con procesos de inyección de plásticos, intrusión, pultrusión entre otros, tales como las pilas marítimas (Zyka & Mohajerani, 2016), con lo

cual se aprovechan las propiedades de los polímeros ante la producción directa a través del petróleo u otros materiales vírgenes debido a el consumo de materias primas, electricidad, agua, entre otros insumos, que serían necesarios para la extracción y producción de nuevos materiales. Dentro de los plásticos reciclados, el PEAD puede ser utilizado de forma estructural en la arquitectura, por su posibilidad de reciclaje, baja emisión de sustancias tóxicas (Garraín et al., 2008) y propiedades mecánicas. La fabricación de un compuesto de PEAD y fibra de vidrio puede potenciar las cualidades del material producido, lo cual permite el uso sostenible para estructuras. Por lo tanto, se maximiza el ciclo de vida de los materiales plásticos y se fomentan las propuestas de construcción con protección ambiental en el país.

*Autor para la correspondencia: franciscosc@comunidad.unam.mx

Correo electrónico: franciscosc@comunidad.unam.mx (Francisco Solis-Campos), perla.santana@fa.unam.mx (Perla Rafael Santa Ana Lozada)

La investigación de PEAD reciclado como material estructural, reforzado con fibra de vidrio para conformar perfiles estructurales aplicados a estructuras en la arquitectura de México, fomenta la construcción sostenible, soluciones ambientales y estructurales para la actualidad nacional y global.

La producción mundial de RSU (residuos sólidos urbanos) alcanzó aproximadamente, 1,300 millones de toneladas anuales en 2010, y podría crecer hasta los 2,200 millones en el año 2025 (Hoorweg & Bhada-Tata, 2012).

En México durante el 2020, la generación de residuos per cápita calculada fue de 0.944 kg/hab/día y la generación total en el país se estima en 120,128 t/día (Naturales, 2020).

Los plásticos representan el 11% de los RSU. El polietileno de alta densidad es segundo lugar en consumo de plásticos con 15.1% y primero en producción con 17.3% según cifras de la ANIPAC (*Estudios ANIPAC*, 2022).

La fabricación de objetos con ciclos de vida cortos propicia su conversión en desechos. A esto se suma la poca capacidad de re uso, reciclaje y reducción de insumos.

Usar materiales que podrían convertirse en un desperdicio y contaminante resulta en una alternativa viable para la construcción, como se ha presentado en investigaciones de Thomas Nosker y Richard G. Lampo en puentes y durmientes para líneas de ferrocarril, así como, Magued Iskander, en pilotes marítimos.

El desconocimiento de un sistema constructivo que emplee polímeros, genera su poca utilización a pesar de poder ser tan sencillos como construir con madera, con el beneficio de propiedades a la corrosión y pudrición (Chandra et al., s. f.).

Existen pocos ejemplos del uso de termoplásticos reciclados en muros divisorios, fachadas y puentes (como el muelle en Tiffany Street 1998 o el Puente en arco Albany NY 2000), con una limitada aplicación dentro de las estructuras, así como un desconocimiento de las técnicas y procedimientos constructivos para formar estructuras con estos (Lampo et al., 2018). Autores como Magued Iskander, han realizado investigaciones sobre la utilidad de los termoplásticos como el polietileno de alta densidad y el polipropileno reciclados, aplicados a pilotes marítimos, en donde se reconoce la utilidad de estos materiales, los puntos para próximas investigaciones y la necesidad de formar normas que permitan la ampliación del uso de estos materiales reciclados (Bozorg-Haddad et al., 2012), para aprovechar sus propiedades, aunado al uso de elementos que podrían convertirse en un residuo. Otro uso extendido ha sido para durmientes en líneas de ferrocarril, donde también se ha sustituido a la madera (Lotfy et al., 2016).

El objetivo general de esta investigación es diseñar un material compuesto eficiente en la construcción, a partir del polietileno de alta densidad reciclado, reforzado por fibra de vidrio corta clase E, para la producción de perfiles que sirvan en cubiertas ligeras. Los objetivos específicos son, determinar las propiedades mecánicas y físicas, de los perfiles, mediante la caracterización (obtención de información del material, a través de su interacción con un estímulo). Formar un análisis e interpretación de datos estadístico para pronosticar los valores de las propiedades mecánicas y físicas. Contrastar los resultados con los pronosticados en la regla de las mezclas (ROM) y el estudio del estado del arte. Determinar la aplicación dentro de estructuras arquitectónicas en la Ciudad de México, mediante modelos 3d para la visualización arquitectónica, así como el análisis y diseño estructural.

La hipótesis es que al conformar por moldeo de inyección el polietileno de alta densidad reciclado, reforzado con fibra de vidrio corta clase E, dispuesta al azar, se puede generar un compuesto con interface eficiente, el cual cumpla con las resistencias necesarias para ser utilizado en producir perfiles que sirvan como estructura en cubiertas, dentro de la arquitectura de la Ciudad de México.

Actualmente el desarrollo arquitectónico y en sí el ramo de la construcción en general debe incentivar la gestión de sostenibilidad (es decir, compensaciones entre medio ambiente y desarrollo), prevención de la contaminación, tecnologías, normas ambientales, enfoque del análisis científico en la toma de decisiones, la implementación de los asociaciones para la gestión de recursos, el cumplimiento normativo y enfoques para cumplir con las obligaciones intergeneracionales en materia de gestión de los recursos. Ante la situación de emergencia ambiental a la cual la humanidad de enfrenta, es prioridad desarrollar estrategias de implementación y examinar la efectividad de estrategias de sostenibilidad. Centrarse en análisis transdisciplinarios basados en estudios comparativos de práctica o reforma de políticas.

La gestión de los residuos proporciona soluciones al problema que representan los desechos, en el cual se encuentran las sociedades actuales, este problema no es exclusivo de los plásticos (Frech, 2002). Una combinación de medidas legislativas e iniciativas gubernamentales, el aumento en el costo de eliminación en vertederos y el interés público en apoyo del reciclaje han sido soluciones.

Las estrategias para la gestión de residuos se basan en tres directrices:

- Evitar, es decir, reducir y, si es posible, evitar producir Residuos en origen. Sin desperdicio = sin problema.
- Recuperación, la recuperación de materiales del flujo de residuos para reciclar.
- Eliminación, eliminación de materiales no reciclables, por ejemplo, por vertedero.

El segundo punto se puede aplicar a los problemas de los residuos plásticos mediante la recuperación de material destinado a vertederos. Por lo tanto, plástico el material recuperado de la corriente de residuos se denomina "recuperación" (Goodship, 2007).

2. Marco conceptual

La ciencia de materiales estudia las interrelaciones entre las propiedades de los materiales, su constitución o microestructura interna y su procesado o tratamiento como factores que alteran su microestructura y propiedades. La ciencia de materiales requiere de ensayos y técnicas que verifiquen los modelos y simulaciones al utilizar técnicas de caracterización, entre las cuales se encuentran ensayos mecánicos, análisis térmico, microscopías etc. (Martin Piris et al., 2012).

La ingeniería de materiales se fundamenta en las relaciones propiedad-estructura y diseña la estructura de un material para conseguir propiedades previstas (Callister, 2019).

Los polímeros son materiales formados por la repetición de partes o segmentos llamados monómeros, los cuales tienen enlaces covalentes para la formación de cadenas gigantes de gran peso molecular. Los polímeros se subdividen según su comportamiento ante el calor y propiedades como termoestables, termoplásticos y elastómeros (Martin Piris et al., 2012).

Los materiales compuestos son la unión de dos o más materiales para obtener propiedades que no tendrían los que lo componen de forma individual. Se puede decir que son materiales de diseño para obtener propiedades adecuadas según su utilidad y entorno. También poseen características y propiedades según sus componentes. Claros ejemplos son el concreto, resinas con fibra de carbono y la fibra de vidrio comercial. Se componen de una matriz y un refuerzo, los cuales se encuentran adheridos y no es posible separarlos si no es por métodos complejos.

Existen también los semiconductores los cuales tienen propiedades intermedias de conductividad eléctrica (Callister, 2019).

Por su parte, el polietileno es un termoplástico, que cuenta con diferentes variedades según su densidad: baja densidad ($0.910\text{--}0.925\text{ g/cm}^3$), media densidad ($0.926\text{--}0.940\text{ g/cm}^3$), alta densidad (0.940 g/cm^3), ultra alta densidad (0.970 g/cm^3) (Polietileno de alta densidad, 2020).

El LDPE tiene un módulo más bajo y se adapta bien para aplicaciones como películas flexibles, películas agrícolas, bolsas y botellas exprimibles. El HDPE es más resistente y es adecuado para contenedores relativamente rígidos, incluidos botellas de leche y detergente. Además, el HDPE está menos sujeto a la degradación por luz ultravioleta (UV).

La resistencia a la degradación UV del HDPE ofrece una amplia gama de potenciales para su uso, como aplicaciones al aire libre para PEAD reciclado (posconsumo), incluido el reciclado llamado madera plástica (RPL) para aplicaciones que no soportan carga (Spalding & Chatterjee, 2017), como es el caso de pisos, barandales y vigas con cargas ligeras, como las utilizadas en jardines o pergolados.

Para aplicaciones estructurales de PEAD reciclado, se debe incluir un agente reforzante.

El reciclaje de circuito abierto de envases de PEAD para producir madera plástica es una ventaja (Spalding & Chatterjee, 2017).

Las aplicaciones de embalaje de un solo uso, como los envases, son una fuente de plásticos reciclados para una amplia gama de aplicaciones. Desafortunadamente el PEBD (polietileno de baja densidad), tiene resistencias bajas, lo cual limita sus aplicaciones tras su primer uso, no es adecuado para aplicaciones estructurales incluso con la adición de agentes de refuerzo (Spalding & Chatterjee, 2017).

Las fibras de vidrio pueden fabricarse a partir de fundidos con diversas viscosidades y composiciones. El compuesto base de las fibras de vidrio es el dióxido de Silicio SiO_2 . La fibra de vidrio fue producida por primera vez como tal por Russell Games en la empresa Orwen Collings, con la finalidad de utilizarse en la construcción como aislante térmico.

Los vidrios se forman mediante un derretimiento rápido y enfriado a temperatura ambiente. Este material vidrioso no es termodinámicamente estable, para efectos prácticos se toma en cuenta como un sólido estable. Las fibras de vidrio se producen principalmente a través del vidrio E, formado por borosilicato y alúmina. es una composición de vidrio que confiere fuerza,

rigidez, resistencia a la corrosión, baja conductividad eléctrica y propiedades esencialmente isotrópicas (Wallenberger & Bingham, 2010).

Los ingredientes son minerales que reaccionan y se funden en un horno donde se eliminan las inclusiones gaseosas y se forma el vidrio a base de sílice. El vidrio fluye debido al calor a través de canales. Posteriormente la temperatura se reduce para permitir la formación de fibras cuando el fluido cae a través de orificios, los cuales determinarán el diámetro de los filamentos. Este proceso puede producir productos que varían en diámetro de filamento individual de 4 a $40\text{ }\mu\text{m}$ y en número de filamentos por paquete de 200 a 4.000. Los filamentos se enrollan en un carrete y son recubiertos con una capa protectora la cual determina las propiedades de interface entre la fibra y la matriz polimérica cuando se forman materiales compuestos. La fibra de vidrio puede ser enrollada o picada (Wallenberger & Bingham, 2010).

3. Diseño experimental

Mediante la mecánica de materiales compuestos se pueden conocer ecuaciones que permitan tener un parámetro de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales (*Mechanics of Composite Structural Elements* | Holm Altenbach | Springer, 2021), lo cual resulta útil para conocer un diseño de mezcla inicial. Las matrices poliméricas, juegan un papel importante dentro de los materiales compuestos. Mantienen las fibras en su lugar, y permiten la transmisión de cargas entre ellas para que desempeñen su función estructural. Las protege del medio ambiente, manejo, agrietamiento y cortadura (Martin Piris et al., 2012).

El material propuesto consta de una matriz reciclada de polietileno de alta densidad, la cual se presenta triturada, y refuerzo de fibra de vidrio corta clase E, dispuesta al azar en una proporción del 30%.

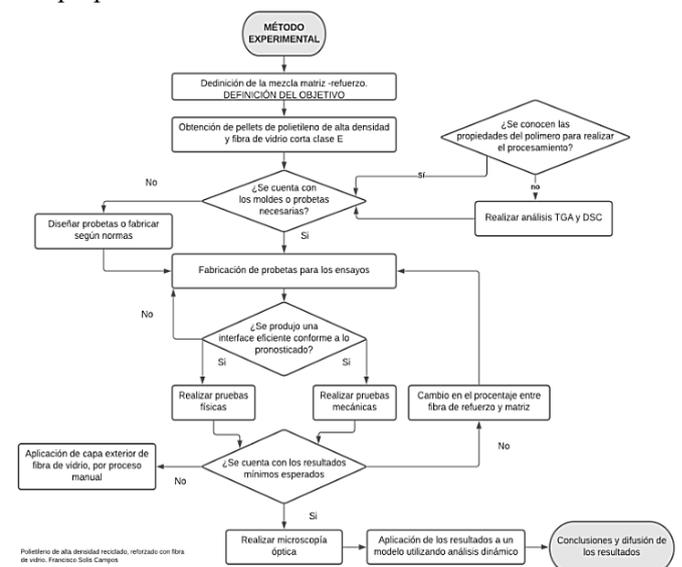


Figura 1: Diagrama de método experimental

Dentro de la experimentación para el material, se han realizado pruebas de laboratorio para obtener la información sobre la densidad conforme a la norma ASTM D-6111-03 (D20 Committee, 2020a), para obtener los valores de

resistencia a la compresión ASTM D-6108-03 (D20 Committee, 2020b) y tensión ASTM D-638-14 (*Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*, s. f.), también se ha consultado la norma ASTM D7568-17, para especificaciones de madera plástica, basada en polietileno de alta densidad (Standard Specification for Polyethylene-Based Structural-Grade Plastic Lumber for Outdoor Applications, 2017). Las pruebas para las resistencias mecánicas fueron realizadas en el LMSE (Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales) de la Facultad de Arquitectura de la UNAM.

El objetivo ha sido tener una correlación de variables entre la densidad la cual depende de la fracción volumétrica de los materiales y las resistencias mecánicas a compresión y a tensión, para obtener una gráfica de regresión lineal que permita comprar los resultados pronosticados y esperados, con los obtenidos. Posteriormente la aplicación de los datos (previamente analizados e interpretados de forma estadística) para la aplicación en un proyecto que considere una cubierta de gran claro con armaduras, las cuales descomponen la fuerza de flexión en tensión y compresión (Lozada & R, 2018).

Tabla 1: Pruebas de laboratorio requeridas.

Prueba	Dimensiones de probeta	Número de probetas	Velocidad de la prueba	Duración esperada	Resultados esperados
Compresión. ASTM D-6108	3x3x6	5	6 mm/min	1 - 5 min	247.69 Kg/cm ²
Tensión. ASTM D-638	Imagen 1	5	1.25 mm/min	10.5 - 5 min	217 Kg/cm ²
Densidad ASTM D-6111	3x3x6	5		10 min	1.055 g/cm ³

Las pruebas para compresión se realizaron conforme a lo establecido por la norma, con una deformación de 0.03 mm/mm, pero debido a que el tiempo de la prueba salió de lo establecido y no se encontró un esfuerzo máximo, se decide llevar hasta la falla a las demás probetas. Se utilizó una velocidad de 0.01 mm/mm, con lo cual se puede observar con mayor claridad los esfuerzos y formar una gráfica que permita la interpretación de los datos a utilizar. Dentro de los datos obtenidos el coeficiente de variación es bajo, debido a que los datos obtenidos presentan similitud, lo cual tiene relación con un proceso de producción similar entre las piezas, a pesar de tratarse de un compuesto reforzado por fibras cortas al azar.

La media que se presenta para módulo de elasticidad es de 6300.16 Kg/cm², para un esfuerzo a la deformación del 3% es de 157.33 Kg/cm², el esfuerzo máximo es 213.78 Kg/cm² y la densidad de las probetas es de 1.045 g/cm³.

Las gráficas de esfuerzo – deformación presentan una similitud en su comportamiento. Por lo observado en los datos estadísticos y en la base de datos obtenidos, los resultados son similares.

Tabla 2: Resultado de las pruebas a compresión

	Unidad	C-01	C-02	C-03	C-04	C-05
Módulo elástico	Kg/cm ²	6,055.30	6,115.20	6,954.23	6,674.35	5,701.73
Esfuerzo al límite elástico	Kg/cm ²	129.00	146.08	137.26	138.31	115.03
Esfuerzo a una deformación de 3%	Kg/cm ²	189.46	199.49	191.24	195.58	192.06
Esfuerzo a ruptura	Kg/cm ²	202.99	210.91	212.53	229.46	213.00
Deformación a ruptura	%	0.15	0.14	0.14	0.14	0.14
Densidad	g/cm ³	1.039	1.045	1.046	1.055	1.047
	Promedio	Desviación estándar		% desviación		
Módulo elástico	6,300.16	505.00		8.02%		
Esfuerzo al límite elástico	133.14	11.80		8.86%		
Esfuerzo a una deformación de 3%	193.57	3.99		2.06%		
Esfuerzo a ruptura	213.78	9.65		4.52%		
Deformación a ruptura	0.14	0.004		3.15%		
Densidad	1.046	0.006		0.55%		

Dentro de la gráfica esfuerzo – deformación se obtienen los siguientes resultados:

- Esfuerzo máximo de 229.46 Kg/cm². Similar a ROM
- Esfuerzo a una deformación 3% y límite elástico, mayor que madera plástica.
- Esfuerzo máximo a una deformación del 3% 162.07 Kg/cm².
- Material de baja densidad que presenta un comportamiento dúctil
- Comportamiento viscoelástico ante una deformación posterior al 3%.
- Deformación tipo barril (D20 Committee, 2020b)
El resultado de la ecuación para pronosticar el esfuerzo máximo, presenta una alta correlación con los resultados obtenidos (239.70 Kg/cm²).

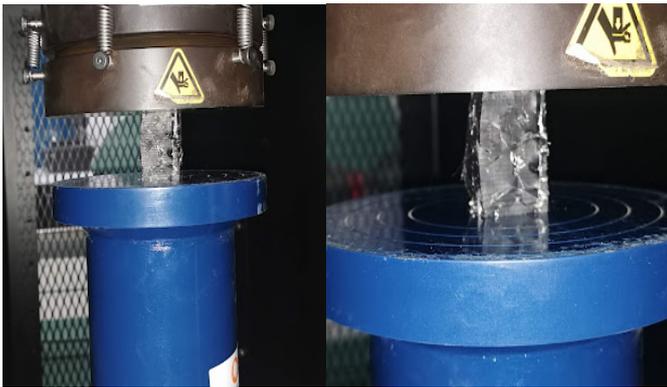


Figura 2: Pruebas de laboratorio para propiedades a compresión

Los ensayos realizados se realizaron con base en la norma ASTM D638-14 Método de prueba estándar para las propiedades de tensión de los plásticos (*Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*, s. f.). Con estos ensayos se determinan las propiedades de tensión para los materiales plásticos reforzados o no, bajo condiciones definidas de pre tratamiento, humedad y velocidad de la máquina con la que trabajará. En este caso la norma aplica para los plásticos en general y no sólo para los reciclados o los llamados madera plástica.

Tabla 1: Resultados de las pruebas a tensión

	Unidad	T-01	T-02	T-03	T-04	T-05
Módulo elástico	Kg/cm ²	6,289.30	7,614.21	6,693.43	6,302.52	7,194.25
Esfuerzo al límite elástico	Kg/cm ²	107.11	110.140	110.66	94.53	110.85
Esfuerzo a una deformación de 3%	Kg/cm ²	176.24	173.03	179.62	170.62	189.960
Esfuerzo a ruptura	Kg/cm ²	228.38	223.38	232.49	221.11	242.72
Deformación a ruptura	%	3.486	2.765	3.114	3.224	3.193
Densidad	g/cm ³	1.040	1.035	1.046	1.032	1.052
	Promedio	Desviación estándar		% desviación		
Módulo elástico	6,819.34	577.82		8.47%		
Esfuerzo al límite elástico	106.66	6.95		6.51%		
Esfuerzo a una deformación de 3%	179.49	11.51		6.41%		
Esfuerzo a ruptura	229.62	8.56		3.73%		
Deformación a ruptura	3.16	0.26		8.22%		
Densidad	1.041	0.008		0.78%		

Las gráficas obtenidas a partir de la máquina de pruebas universales, muestran regularidad y una falla con una baja desviación estándar.

La media del esfuerzo máximo es 229.62 Kg/cm², similar al límite plástico a compresión, se presentan valores de esfuerzo máximo similar a los presentados por la madera plástica y se

define un esfuerzo a una deformación del 3% con una media de 179.49 Kg/cm². El comportamiento a tensión es diferente al de compresión en la deformación, en la cual se presenta la falla a los 3.16 mm/mm, este comportamiento también influye en el módulo de elasticidad.



Figura 3: Máquina de pruebas universales LMSE. Facultad de Arquitectura UNAM.

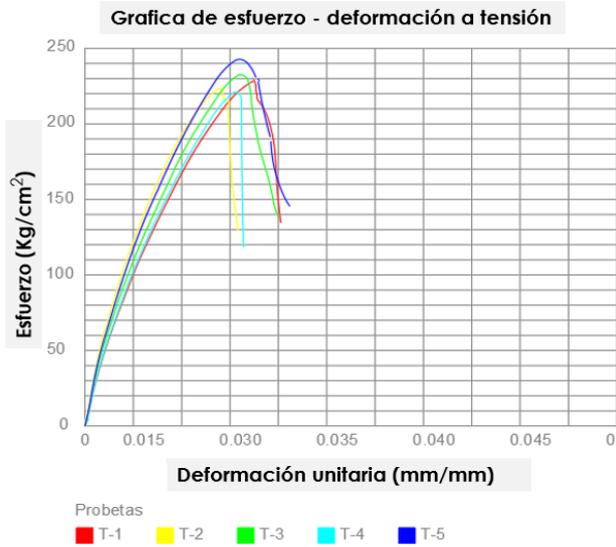
Las gráficas de esfuerzo-deformación, muestran que el material posee un esfuerzo máximo a la ruptura de 242.72 Kg/cm². Se determina un esfuerzo a la deformación de 3% un valor superior a los 150 Kg cm². Han existido casos para pilas marítimas donde el material plástico reciclado es reforzado por varillas corrugadas de acero (Bozorg-Haddad et al., 2012) lo cual puede representar amplias aplicaciones al material.



Gráfica 1: Esfuerzo - deformación para compresión.

En la gráfica de esfuerzo – deformación correspondiente a la tensión, la deformación del 3% se encuentra antes de la falla,

por lo tanto, se toma el esfuerzo al límite elástico para los valores de análisis estructural.



Gráfica 2: Esfuerzo - deformación para tensión.

Para considerar los procedimientos de fabricación se realizaron análisis térmicos en el Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM. Se comenzó por elegir los fragmentos de polietileno de alta densidad reciclado. La máquina para realizar el análisis realizó el pesaje de forma automática.

Primero se realizó una prueba en atmósfera de aire, con una muestra de 4.091 mg.

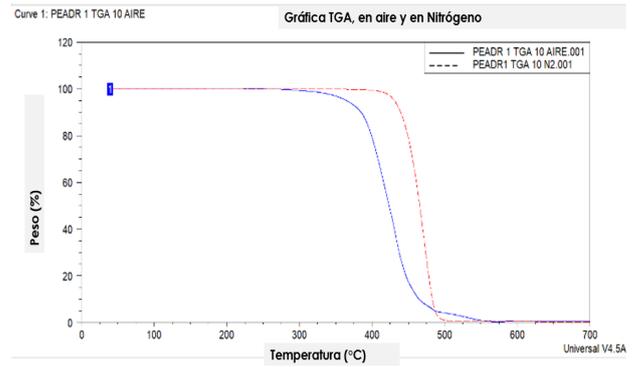
El polímero se calentó desde la temperatura ambiente hasta los 700 °C. A los 260 °C, se comienza a observar la pérdida de masa, con un 99.98 %, respecto al original. La pérdida de masa aproximada al 5%, se observa a los 365 °C, con 94.98 % de masa, respecto a la original. Mientras que a las 375 °C se presenta una masa del 90 %.

Después se realizó el análisis en una atmósfera de Nitrógeno. El peso fue 4.783 mg, el cual fue colocado, dentro de la charola para comenzar con el análisis. La máquina para análisis se encuentra conectada a una computadora en la cual se determina el rango para calentar el polímero.

A los 255 °C se comenzó a observar una pérdida de masa en la muestra. Se pesó el 99.99 % de la masa original, lo cual pudo haber sido por restos de humedad u otros compuestos dentro del polímero.

Hasta los 430 °C, se observa una pérdida de aproximadamente el 5% de la masa original, se pesaron 95.35 %. A los 440 °C, la muestra contuvo una masa de 89.56 %. A los 480 °C, la masa de la muestra, respecto a la original, fue de 15.87%.

Debido a lo anterior, se obtiene el parámetro para realizar el próximo análisis que es el escaneo diferencial de barrido (DCS), hasta una temperatura de 300 °C, para evitar calentar la muestra hasta la degradación y observar las temperaturas de fusión y cristalización.

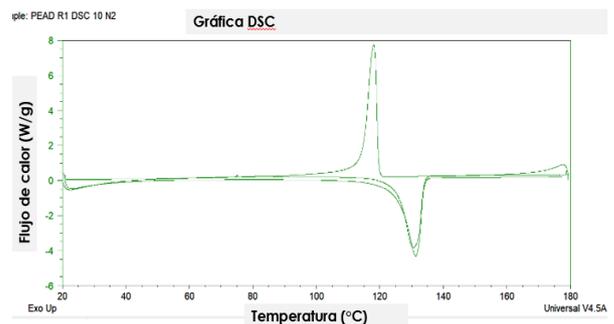


Gráfica 3: Análisis termogravimétrico (TGA).

El escaneo diferencial de barrido (DSC), mostró los valores de temperatura de fusión, que comienza a las 135 °C. También, la temperatura de cristalización. Dichos datos son útiles para conocer que la matriz se comporta de forma similar al polímero virgen (Kissin, 2013) y se pueden aplicar procesos de producción iguales.



Figura 4: Máquina para análisis TGA. IIM UNAM



Gráfica 4: Escaneo diferencial de barrido (DSC)

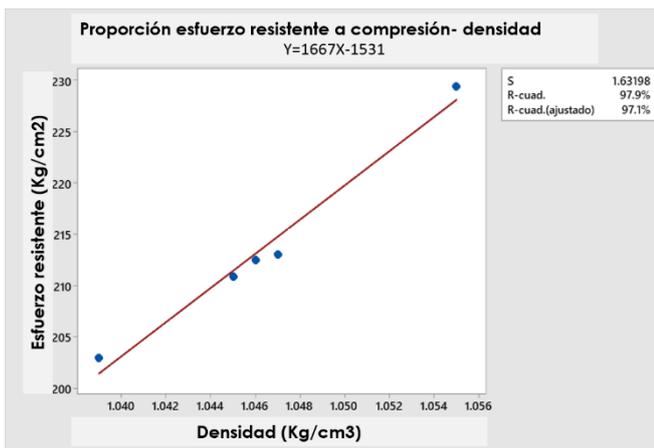
Se comenzó con tomar una muestra de PEAD la cual fue pesada. Se obtuvo un resultado de 1.46 mg. Posteriormente a ser sellada se introdujo en un recipiente de Aluminio, el cual fue cerrado y posteriormente introducido en la máquina para análisis. Se programó el incremento de temperatura desde ambiente, hasta 180 °C, seguido del enfriamiento hasta temperatura ambiente y un nuevo calentamiento. A través de lo anterior, se pudo conocer la temperatura de fusión del polímero Tf, así como la de cristalización Tc.

La temperatura de fusión se alcanza aproximadamente a los 131 °C, mientras que la de cristalización a los 120 °C, siendo parámetros cercanos a los del polímero en estado virgen. A demás se confirma la estabilidad térmica.

A partir de la información obtenida en el análisis TGA y el DSC, se puede concluir que la producción del material compuesto puede realizarse en una máquina inyectora, en un rango desde los 150 °C, hasta los 220 °C.

4. Análisis y discusión de los resultados.

Los resultados de la resistencia a la compresión, tienen una alta correlación con la densidad, por lo que el material aumenta su resistencia al incrementar la fracción volumétrica. Al llevar las probetas hasta la ruptura, se encuentra que la mayoría de las zonas de falla se encuentran donde existe una mayor concentración de fibra debido a que no se presenta un trabajo uniforme entre la matriz y el refuerzo como lo hace en otras zonas. Es importante recordar que se ha determinado que la máxima fracción volumétrica a utilizar en este tipo de compuesto es del 30% (Askeland et al., 2017). La ligereza y la resistencia del material lo hacen factible para ser introducido en una estructura ligera para cubierta con dimensiones de con ancho y largo de 8 metros y altura de la misma medida.



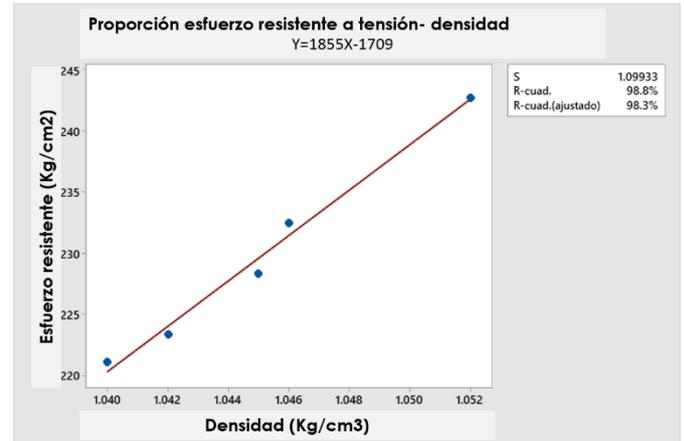
Resumen del modelo

	R-cuad.
S	1.63198
R-cuad.	97.9%
R-cuad.(ajustado)	97.14%

Gráfica 5: Regresión lineal para las variables de densidad y resistencia a la compresión.

Los parámetros de producción industrializada son factor para aumentar la uniformidad de los resultados y mantener una alta correlación.

En el caso de los resultados para resistencia a la tensión muestran una similitud a los máximos obtenidos en compresión. Sin embargo, el comportamiento del material ante dicho esfuerzo es diferente, ya que la falla se presenta en una menor deformación, además que el módulo de elasticidad es mayor. Los resultados permiten comprender que se deben utilizar factores de seguridad que sirvan para realizar el análisis y diseño estructural de los perfiles que estarán sujetos a tensión o a compresión dentro de una armadura.



Estadísticas

Variable	Media	Error estándar	Desv.Est.	Varianza	CoefVar	Mínimo	Máximo	Rango
C1	1.0450	0.00205	0.00458	0.00002	0.44	1.0400	1.0520	0.0120
C2	229.62	3.83	8.56	73.19	3.73	221.11	242.72	21.61

Resumen del modelo

	R-cuad.
S	1.09933
R-cuad.	98.76%
R-cuad.(ajustado)	98.35%

Gráfica 6: Regresión lineal para las variables de densidad y resistencia a la tensión.

Los resultados obtenidos son mayores a los reportados por la madera plástica (Salcedo Cortés et al., 2015). En el caso de los aspectos térmicos para la producción del material se ha encontrado que los puntos de fusión y cristalización son similares a los del polímero virgen, incluso no se pierden considerablemente las propiedades mecánicas.

Respecto a la densidad, resulta claro que la correlación entre las dimensiones de las probetas y cantidad de fibra es alta, por lo cual un proceso de fabricación controlado, puede lograr tener una uniformidad en esta propiedad. Así mismo, se corrobora que dicha propiedad tiene también correlación con el aumento o disminución de las propiedades mecánicas estudiadas.

Para comprender de mejor forma el comportamiento del material dentro de una estructura también se deben considerar factores como la temperatura o la fluencia lenta, ya que esta última provoca la disminución de las resistencias mecánicas, al tener una carga continua en un periodo de tiempo prolongado, lo cual hace necesario el análisis mediante pruebas de laboratorio, que permitan obtener un método de cálculo completo y acorde a la realidad de aplicación.

Dentro del estado del arte se encuentran ejemplos para utilizar modelos que permitan comprender el comportamiento del material en diversas proporciones (Bajracharya et al., 2016) y bajo determinadas condiciones climáticas de uso (Slaughter, 2004), lo cual representa un aporte en la investigación de los materiales poliméricos reciclados y hace evidente la necesidad de una mayor cantidad de investigación en diversos entornos, que guían hacia la óptima aplicación y producción de materiales.

5. Aplicación arquitectónica

Tras la caracterización del material a través de las pruebas de laboratorio realizadas se ha realizado el diseño de una estructura ligera de 8x8 metros en planta por 8 metros de altura, en forma de cúpula, la cual sirva como un espacio de planta libre, fabricación sencilla debido a su ligereza, pueda permanecer o ser retirada y re colocada en otro espacio. Los procedimientos de cálculo para estructuras con materiales similares al propuesto, deben tomar en cuenta los factores climáticos y de resistencia tras determinados años con aplicación de esfuerzos. Por este motivo, para la determinación de esfuerzos permisibles se utiliza información previa (Slaughter, 2004), que se encuentra en condiciones de la Ciudad de México. Se debe aclarar que el uso en distintas condiciones requiere el estudio de estas para considerar un proyecto de aplicación.

Los datos a introducir en la herramienta digital Midasoft, son los siguientes: módulo de elasticidad, resistencia a la compresión, resistencia a la tensión, densidad y expansión térmica lineal. Al ser una armadura la cual descompone la fuerza de flexión en tensión y compresión, se analizarán dichas cargas y resistencias.

El esfuerzo permisible a la compresión se calculará mediante la siguiente expresión:

$$FC = BC \cdot Ca \cdot Ct \cdot Cm \cdot Cv \cdot CD$$

Ecuación 1: Esfuerzos permisibles

Donde:

- BC= esfuerzo a una deformación del 3%
- X10yr = 3 (factor de ajuste por propiedad del material)
- Ca= 1/(X10yr·1.3)
- Ct = 0.75 (factor de ajuste por temperatura)
- Cm = 1.0 (factor de ajuste por humedad)
- CD = 2.35 (Factor de ajuste por duración).

En el caso de la resistencia admisible a la tensión se utilizarán las anteriores expresiones aplicadas a los valores obtenidos de la caracterización para tensión.

Como se ha mencionado anteriormente los factores utilizados en el presente diseño se toman de investigaciones previas (Salcedo Cortés et al., 2015), (Carroll et al., 2001).

Por lo cual el valor obtenido para el esfuerzo admisible es de 71.10 Kg/cm², en el caso de compresión y 81.12 Kg/cm², en el caso de la tensión.

Para las cargas aplicadas a la cubierta se utilizan los siguientes valores:

Tabla 4: Cargas aplicadas a la cubierta

Elemento	Cantidad (Kg/m ²)	Unidad
Sistema de cubierta a base de lámina KR-18 calibre 22 y aislante MBI Owens Corning	9.35	Kg/cm ²
Instalaciones	10.00	Kg/cm ²
Plafón	40.00	Kg/cm ²
Carga muerta	59.35	Kg/cm²
Carga viva media	5.0	Kg/cm ²
Carga viva instantánea	20.0	Kg/cm ²
Carga viva máxima	40.0	Kg/cm ²
Carga de servicio media	64.35	Kg/cm ²
Carga de servicio instantánea	79.35	Kg/cm ²
Carga de servicio máxima	99.35	Kg/cm ²

Al utilizar los valores de la caracterización y los obtenidos en el estado del arte, se formó un modelo para el análisis estructural, en el cual se observa que las deformaciones para carga propia son admisibles, sin embargo, el viento la carga accidental que más influencia, principalmente debido a la ligereza de la estructura.

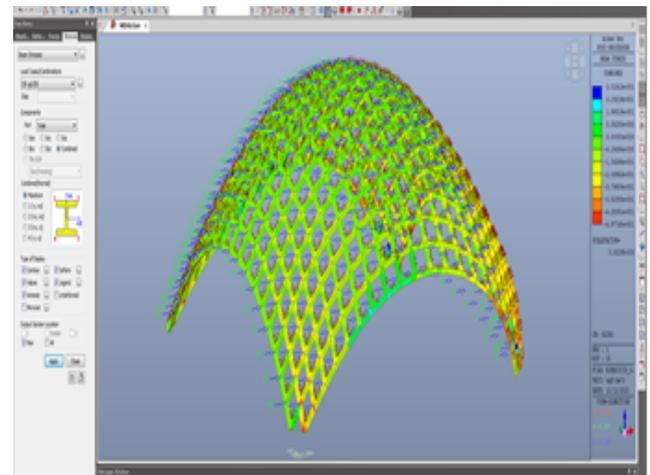
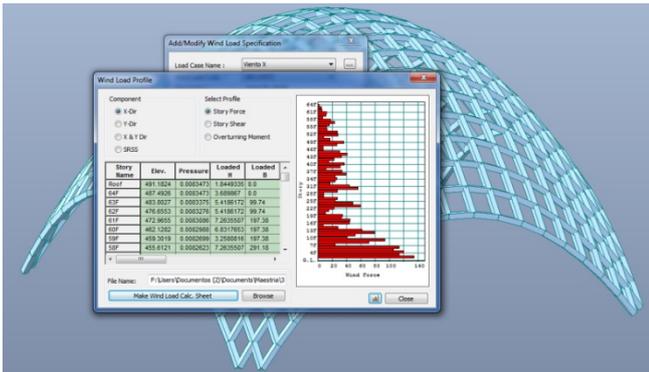
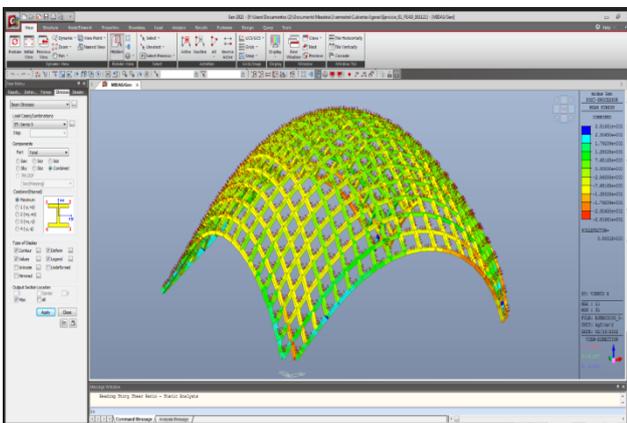


Figura 5: Deformaciones de la estructura por peso propio, carga viva y muerta.

Posterior a la definición de las cargas y el medio donde se encontrará la estructura, se introdujeron los datos de las propiedades mecánicas y físicas en el programa Midasoft. Se definieron las combinaciones de carga, el tipo de estructura, propiedades y geometría provisional de los perfiles que ha sido cuadrada de 8x8 m, con una separación de 0.50 m entre ellos. Se introdujeron los datos para el análisis por viento, conforme a las condiciones de la Ciudad de México de las isotacas de la CFE (CFE, 2008), para un periodo de retorno de 10 años, que es el mismo periodo de carga utilizado.



Cálculo de la velocidad de diseño mediante la ecuación $V_d = F_t F_r Z V_r$



Figuras 6 y 7. Esfuerzos por efecto del viento.

Los esfuerzos admisibles continúan siendo menores que los que resulta del análisis estructural. Lo cual, permite conocer que el material cuenta con posibilidades de diseño en estructuras de mayor claro.

6. Conclusiones

Los termoplásticos como el polietileno de alta densidad han tenido una amplia producción la cual continúa creciendo, en diversos campos de aplicación. Su versatilidad, propiedades y métodos de producción han sido factores para su amplia fabricación, lo cual ha desembocado en una gran cantidad de residuos, debido a los cortos ciclos de vida presentes en los objetos fabricados a partir de estos materiales. El reciclaje es una forma de hacer frente a la contaminación por residuos plásticos. En la construcción se han encontrado algunos ejemplos donde se aprovechan los residuos de polietileno de alta densidad y polipropileno, para la manufactura de materiales, en muros divisorios, pisos, acabados, puentes y barandales. Sin embargo, aún existen áreas donde se debe profundizar para lograr un mejor aprovechamiento de los materiales reciclados, así como generar normas que permitan la extensión de su uso.

En la presente investigación se ha diseñado un material compuesto a partir del polietileno de alta, reforzado por fibra de vidrio, se han realizado pruebas de laboratorio, para conocer las propiedades a compresión, tensión y densidad.

Posteriormente se han analizado los esfuerzos resistentes y su correlación con la densidad, para definir la aplicación de este material en la fabricación de perfiles que se empleen para construir armaduras, colocadas como estructura en cubiertas ligeras.

El producto presenta una mezcla homogénea, sin regularidad en la dispersión de la fibra. Los procedimientos de fabricación son los mismos que los utilizados para los plásticos vírgenes. En el caso de los materiales compuestos reforzados por fibra de vidrio corta al azar, se debe utilizar un proceso de inyección que incluya un doble husillo o la posibilidad de una mejor dispersión uniforme de las fibras dentro de la matriz polimérica. Sin embargo, un proceso que controle la dirección de las fibras puede resultar más beneficiosos en términos de los resultados de propiedades mecánicas. Existe una correlación alta entre el porcentaje de matriz y refuerzo, con los resultados de las propiedades físicas y mecánicas.

Al integrar el 30% de fibra de vidrio de refuerzo, aumenta la densidad un 9.12%, se obtiene una media de 1.041 g/m³.

Con la misma proporción la resistencia máxima a compresión, aumenta 22.17%. 229.46 Kg/cm². La resistencia a la tensión es similar a la prevista del polímero virgen. Los anteriores valores de las propiedades, comparados con la madera plástica comercial son superiores.

El material presenta un comportamiento dúctil. También, una baja densidad, lo cual es útil para la facilidad de maniobra en un sistema constructivo. Esta ligereza presente en el sistema estructural y aunado a sus propiedades mecánicas y físicas, hacen necesario que el análisis estructural considere el efecto del viento.

Los valores del comportamiento viscoelástico del material dentro de la caracterización mecánica serán tomados para el análisis estructural.

Las propiedades mecánicas a compresión, tensión y la densidad son aptas para la incorporación en un sistema estructural a base de armaduras, para cubiertas.

La degradación por temperatura, flujo de calor por unidad de masa, temperatura de fusión y cristalización, son similares a las del polímero virgen.

Se hace necesaria la investigación de los efectos de la temperatura y carga a la cual está expuesta la estructura y el material, simulaciones mediante herramientas digitales e incluso modelos a diversas escalas, para tener un mayor entendimiento de la aplicación y diseño dentro de la arquitectura.

Los resultados de la experimentación pertenecen a cinco muestras, como indican las normas ASTM del subcomité D.20.20 para pruebas de compresión y de tensión, sin embargo, es necesario ampliar el número de muestras, para lograr un análisis estadístico que permita una mayor comprensión, análisis y aplicación de los datos. Lo anterior, con el objetivo de llevar la investigación sobre los plásticos reciclados en la construcción a su ampliación de uso y normado.

Agradecimientos

Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico brindado durante la investigación.

Al Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional

Autónoma de México, por permitirme realizar esta investigación, así como el aporte de todos los docentes.

A la Maestra Perla Santa Ana Lozada, por su apoyo y enseñanza durante todo el transcurso de la investigación.

Al Laboratorio de Análisis Térmicos, del Instituto de Investigaciones en Materiales UNAM. Por el apoyo, y asesoría al Dr. Mikhail Zolothikin y a la Ing. Karla Eriseth Morales Reyes.

Al Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales de la Facultad de Arquitectura UNAM. Por permitirme la realización de pruebas mecánicas, al Dr. Alberto Muciño Vélez y al Mtro. Antonio Tahutón Mora.

Al Dr. Fernando Néstor García Castillo, por su asesoría.

Referencias

- Askeland, D. R., Wright, W. J., Bhattacharya, D. k., Chhabra, R. P., & Peralta Rosales, L. (2017). *Ciencia e ingeniería de materiales* (Séptima edición). Cengage Learning Editores.
- Bajracharya, R. M., Manalo, A. C., Karunasena, W., & Lau, K. (2016). Experimental and theoretical studies on the properties of injection moulded glass fibre reinforced mixed plastics composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 84, 393-405. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.02.025>
- Bozorg-Haddad, A., Iskander, M., & Chen, Y. (2012). Compressive strength and creep of recycled HDPE used to manufacture polymeric piling. *Construction and Building Materials*, 26(1), 505-515. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.051>
- Callister, W. D. (2019). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. Reverte.
- Carroll, D., Stone, R., Sirignano, A., Saindon, R., Gose, S., & Friedman, M. (2001). Structural Properties of Recycled Plastic/Sawdust Lumber Decking Planks. *Resources, Conservation and Recycling*. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(00\)00081-1](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(00)00081-1)
- CFE. (2008). *Manual de diseño de obras civiles. Diseño por viento*.
- Chandra, V., Kim, D. J. S., Nosker, D. T. J., & Nagle, G. J. (s. f.). *World's First Thermoplastic Bridges*. 11.
- D20 Committee. (2020a). *Test Method for Bulk Density And Specific Gravity of Plastic Lumber and Shapes by Displacement*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D6111-19A>
- D20 Committee. (2020b). *Test Method for Compressive Properties of Plastic Lumber and Shapes*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D6108-19>
- Estudios ANIPAC. (2022). <https://anipac.org.mx/estudios-anipac/>
- Frech, C. (2002). Green Plastics: An Introduction to the New Science of Biodegradable Plastics (Stevens, E. S.). *Journal of Chemical Education*, 79, 1072. <https://doi.org/10.1021/ed079p1072.1>
- Garraín, D., Vidal, R., Franco, V., & Martínez, P. (2008). Análisis del ciclo de vida del polietileno de alta densidad. 6.
- Goodship, V. (2007). *Introduction to Plastics Recycling*. iSmithers Rapra Publishing.
- Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). Plastics recycling: Challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2115. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0311>
- Kissin, Y. V. (2013). Melting Point of Polyethylene Resin. En Y. V. Kissin (Ed.), *Polyethylene* (pp. 57-72). Hanser. <https://doi.org/10.3139/9781569905210.003>
- Lampo, R., Nosker, T., Nagle, G., Nemeth, S., Palutke, K., & Clark, L. (2018). Demonstration of thermoplastic composite I-beam design bridge at Camp Mackall, NC: Final report on Projects FY08-16 and FY09-31. *Construction Engineering Research Laboratory* (U.S.). <https://doi.org/10.21079/11681/26030>
- Lotfy, I., Farhat, M., Issa, M. A., & Al-Obaidi, M. (2016). Flexural behavior of high-density polyethylene railroad cross-ties. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 230(3), Article 3. <https://trid.trb.org/view/1398881>
- Lozada, S. A., & R, P. (2018). *Sistemas estructurales*. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Arquitectura. <http://up-rid2.up.ac.pa:8080/xmlui/handle/123456789/1822>
- Martin Piris, N., Güemes Gordo, A., Arribas Arribas, C., Badia Pérez, J. M., Fernández López, A., González Prolongo, M., Pintado Sanjuanbenito, J. M., & Salom Coll, C. (2012). *Ciencia de materiales para ingenieros* (Primera edición). Pearson Education.
- Mechanics of Composite Structural Elements* | Holm Altenbach | Springer. (2021, agosto 17). <https://www.springer.com/gp/book/9789811089343>
- Naturales, S. de M. A. y R. (2020, mayo). Presenta Semarnat el Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de Residuos 2020. *gob.mx*. <http://www.gob.mx/semarnat/prensa/presenta-semarnat-el-diagnostico-basico-para-la-gestion-integral-de-residuos-2020?idiom=es>
- Plastimagen. (2022, mayo). <https://www.plastimagen.com.mx/es/prensa/boletines>
- Polietileno de alta densidad. (2020, noviembre 7). [/cmematerials/es/content/polietileno-de-alta-densidad](http://cmematerials/es/content/polietileno-de-alta-densidad)
- Salcedo Cortés, O. M., Santa Ana Lozada, P. R., Zolotukhin, M., Muciño Vélez, A., Rangel Dávalos, J., & Zeevaert Alcantara, L. (2015). *Madera plástica de pead (polietileno de alta densidad) reciclado como material estructural* (Facultad de Arquitectura. Posgrado).
- Slaughter, A. E. (2004). *DESIGN AND FATIGUE OF A STRUCTURAL WOOD-PLASTIC COMPOSITE* By.
- Spalding, M. A., & Chatterjee, A. (2017). *Handbook of Industrial Polyethylene and Technology: Definitive Guide to Manufacturing, Properties, Processing, Applications and Markets* Set. John Wiley & Sons.
- Standard Specification for Polyethylene-Based Structural-Grade Plastic Lumber for Outdoor Applications. (2017). <https://www.astm.org/d7568-17.html>
- Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. (s. f.). Recuperado 9 de febrero de 2022, de <https://www.astm.org/d0638-14.html>
- Wallenberger, F. T., & Bingham, P. A. (2010). *Fiberglass and glass technology: Energy-friendly compositions and applications*. Springer.
- Zyka, K., & Mohajerani, A. (2016). Composite piles: A review. *Construction and Building Materials*, 107, 394-410. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.013>