



# **Universidad Nacional Autónoma de México**

## **Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura**

### **PEAD reciclado reforzado con fibra de vidrio. Aplicación estructural en la arquitectura.**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
MAESTRO EN ARQUITECTURA

En el campo de conocimiento de Tecnologías

**Presenta: Arq. Francisco Solis Campos**

**Tutora: Mtra. Perla Rafael Santa Ana Lozada**

Facultad de Arquitectura, Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, UNAM

**Sinodales:**

**Dr. Mikhail Zolotukhin**

Instituto de Investigaciones en Materiales, Departamento de Polímeros, UNAM

**Dr. Fernando Néstor García Castillo**

Facultad de Estudios Superiores Aragón, UNAM

**Mtro. Jorge Rangel Dávalos**

Facultad de Arquitectura, Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, UNAM

**Dr. Jacinto Cortés Pérez**

Facultad de Estudios Superiores Aragón, UNAM

Ciudad Universitaria, CDMX. Febrero de 2023.



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Agradecimientos

A Mis padres, por su compañía y buenos momentos vividos, en especial durante este proceso.

A la Mtra. Perla Santa Ana Lozada, gracias por sus enseñanzas desde la licenciatura, así como por su gran calidad como profesora y persona, en usted siempre pude encontrar la motivación para seguir en el camino hacia un mayor desarrollo académico y profesional.

Al Dr. Mikhail Zolotukhin, por su asesoría, paciencia y aporte de conocimientos desde el inicio de esta investigación, lo cual ha sido fuente importante para el estudio de los materiales reciclados.

A la I.Q Karla Eriseth Reyes Morales, por su asesoría y apoyo en la realización de los análisis térmicos.

Al Instituto de Investigaciones en Materiales UNAM, Departamento de Polímeros por permitirme la asistencia a sus instalaciones para la realización de los análisis térmicos.

Al Dr. Fernando Néstor García Castillo y al Dr. Jacinto Cortés Pérez por su aporte en la realización de los ensayos de relajación de esfuerzos en el Centro Tecnológico de la FES Aragón.

Al Mtro. Jorge Rangel Dávalos, quien desde el inicio de esta investigación y hasta el final, se encontró atento a su desarrollo y crecimiento.

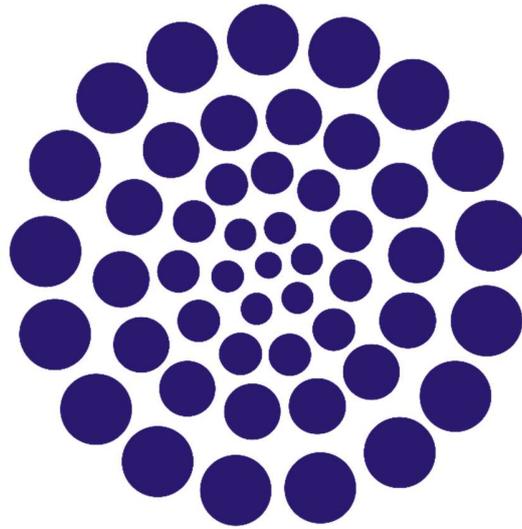
Al Dr. Alberto Muciño Vélez y al Mtro. Antonio Tahuitón Mora, por su apoyo durante la realización de los ensayos de laboratorio y la aportación de sus conocimientos durante la investigación en la etapa experimental.

Al Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales de la Facultad de Arquitectura de la UNAM, por permitirme realizar ensayos de laboratorio.

Al Mtro. Juan Manuel García Garduño, por su constante asesoría y consejos.

Al Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional Autónoma de México, por su gran calidad en todos los aspectos.

## Agradecimientos



# CONACYT

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico brindado durante esta investigación.

## ÍNDICE

<b>Introducción</b> .....	<b>5</b>
<b>1 CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES</b> .....	<b>8</b>
1.1 Clasificación de los materiales.....	9
1.2 Polímeros .....	10
1.3 Termoplásticos .....	11
1.4 Polietileno de alta densidad .....	19
1.5 Procesos de producción de polímeros termoplásticos .....	19
1.6 Materiales compuestos .....	24
1.7 Características mecánicas .....	31
1.8 Análisis térmicos.....	34
<b>2 USO DE PLÁSTICOS RECICLADOS EN LA CONSTRUCCIÓN</b> .....	<b>36</b>
2.1 Residuos plásticos .....	36
2.2 Historia de los materiales compuestos con matriz termoplástica .....	47
2.3 Surgimiento y evolución del polietileno de alta densidad .....	48
2.4 Inicios en reciclaje de plásticos.....	49
2.5 Normatividad para el uso de plásticos reciclados como madera plástica .....	50
2.6 Uso de los termoplásticos en la construcción global .....	51
2.7 Aplicaciones en la industria aeroespacial y automotriz.....	59
2.8 Línea de tiempo historiográfica .....	61
<b>3 DISEÑO EXPERIMENTAL DEL MATERIAL PEAD CON FIBRA DE VIDRIO</b> .....	<b>62</b>
3.1 Método experimental.....	62
3.2 Materiales utilizados .....	63
3.2 Diseño de la experimentación .....	66
3.2.1 Propiedades mecánicas esperadas .....	66
3.2.2 Diseño del material compuesto PEAD reciclado – Fibra de vidrio .....	71
3.3 Normatividad aplicada en el proyecto.....	73
3.4 Propiedades del material. Pruebas de laboratorio .....	74
3.4.1 Ensayos de compresión .....	75
3.4.2 Ensayos de tensión .....	81
3.4.2 Ensayos de relajación de esfuerzos .....	86
3.4.4 Densidad.....	94
3.4.5 Análisis termogravimétrico TGA .....	96
3.4.6 Calorimetría diferencial de barrido DSC .....	99
<b>4 PROYECTO DE APLICACIÓN</b> .....	<b>101</b>
4.1 Definición de las condiciones del medio .....	101
4.1.1 Temperatura y clima.....	101
4.1.2 Viento.....	102
4.1.3 Sismo.....	104
4.1.4 Tiempo de vida útil de la estructura .....	106
4.2 Diseño arquitectónico y geometría estructural .....	106
4.3 Análisis estructural .....	108
4.3.1 Análisis de cargas .....	108
4.3.2 Análisis de la estructura.....	113
4.3.3 Diseño estructural .....	119
4.4 Comparativa con otros materiales .....	123
<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>125</b>
<b>Referencias bibliográficas</b> .....	<b>129</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>139</b>
Anexo 1. Ecuaciones en proceso experimental .....	139
Anexo 2. Gráficas esfuerzo - deformación.....	141
Anexo 3. Protocolo experimental.....	144
Anexo 4. Ordenadas del espectro de respuesta, NTC sismo 2017.....	152

Polietileno de alta densidad reciclado reforzado por fibra de vidrio.  
Aplicación estructural en la arquitectura.

## Introducción

Los contaminantes generados por los residuos sólidos urbanos (RSU), son un problema mundial al ser depositados en ecosistemas como el marino, donde se pueden mantener por miles de millones de años, siendo transportados por las corrientes marítimas debido a su densidad y durabilidad (Colomer, F.J & Gallardo, A, 2007). Dentro de la amplia producción de contaminantes, el polietileno de alta densidad, se encuentra en los primeros lugares de producción y desecho.

Una forma para aprovechar parte de estos residuos es mediante su uso en la construcción a través del reciclaje, lo cual, puede desviar los residuos plásticos de vertederos para la conformación de perfiles estructurales. Esto, se ha realizado en EE UU a través de la madera plástica, sin lograr una consolidación como material normatizado de tal forma que pueda ser aplicado como se realiza con otros materiales convencionales (madera, concreto y acero) y mayormente sin un enfoque de uso estructural, como lo ha sido en muebles y otros objetos, así como en construcciones similares al muelle Tiffany Street en Bronx Nueva York.

Para que lo anterior se logre es necesario conocer a profundidad las propiedades de los materiales y los procedimientos de construcción con base al diseño. También, es necesario establecer procedimientos de evaluación entre el desempeño en la construcción mediante pruebas de laboratorio.

En la presente investigación se ha generado un material compuesto a partir de polietileno de alta densidad reciclado (como matriz) reforzado por fibra de vidrio corta clase E dispuesta al azar, que permita la fabricación de perfiles a utilizar en la construcción de armaduras para cubiertas ligeras de gran claro. Con el fin de conocer las propiedades mecánicas, se utilizó un material triturado que se podría convertir en un residuo y se reforzó para complementar sus propiedades.

Se realizó la caracterización mecánica del material para medir algunas de sus propiedades en arreglos de compresión y tensión (ya que las armaduras descomponen la fuerza de flexión en las anteriores mencionadas) y flexión en cantiléver para la realización de pruebas de relajación de esfuerzo. Adicionalmente se realizó la medición del peso volumétrico y gravedad específica; así como, análisis térmicos (termogravimétrico y escaneo diferencial de barrido). Lo anterior, para realizar un análisis y diseño estructural de una cubierta ligera en un proyecto arquitectónico. Para la realización de este análisis se tomaron en cuenta factores como el comportamiento viscoelástico de los polímeros, la temperatura a la cual estará sujeta la estructura, cargas de diseño según el reglamento de

construcciones de la Ciudad de México, el efecto del viento y del sismo, sobre la estructura.

Con la **hipótesis** 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.

Por lo que **los objetivos** de esta investigación, es generar el diseño de un material compuesto. Eficiente de forma estructural y constructiva en la arquitectura, para cubiertas de gran claro, a través del polietileno de alta densidad reciclado, reforzado por fibra de vidrio, para la producción industrializada de perfiles que formen armaduras como estructura ligera de cubiertas

Determinar propiedades mecánicas y físicas, mediante la caracterización (obtención de información del material, a través de su interacción con un estímulo).

Formar un análisis e interpretación estadística de los datos resultado de los ensayos de laboratorio, 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.

Debido a lo anterior el presente trabajo está dividido en los siguientes capítulos:

Capítulo 1. Contiene los aspectos generales de la ciencia e ingeniería de los materiales. Se tocan temas donde se explica la clasificación, comportamiento, características, propiedades y procesamiento de los materiales, con un mayor enfoque en los polímeros.

Capítulo 2. Contiene el uso de los termoplásticos en la construcción, desde la perspectiva de los residuos plásticos, perspectiva histórica, normatividad en tema de plásticos reciclados y aplicaciones en diversos ramos, con lo cual, se amplía la perspectiva para la aplicación de los plásticos reciclados dentro de la construcción.

Capítulo 3. Se desarrolla el proceso experimental en ensayo de compresión, ensayo de tensión, ensayos de relajación de esfuerzos, ensayos de densidad, análisis termogravimétrico y escaneo diferencial de barrido. Se

han obtenido los resultados para determinar las propiedades del material PEAD reciclado reforzado con fibra de vidrio, su análisis e interpretación estadística.

Capítulo 4. Contiene el proyecto de aplicación, desarrollado a través de la definición de una ubicación en la Ciudad de México, la obtención de la vida útil del material, análisis y diseño estructural, en base a los resultados obtenidos de la experimentación. Se consideraron aspectos sísmicos, de viento, temperatura y tiempo de vida para determinar las características de los perfiles que forman las armaduras de la estructura.

## 1 CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES

**La ciencia e ingeniería** de los materiales ofrece una perspectiva para la clasificación del material compuesto polietileno de alta densidad reciclado reforzado por fibra de vidrio, sus propiedades, clasificación, propiedades pronosticadas y métodos de ensayo.

En esta disciplina, se 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, 1995a)

**Propiedades de los materiales.** se manifiestan en base al tipo y magnitud de respuesta a un estímulo. Se agrupan en seis categorías: mecánicas, eléctricas, térmicas, magnéticas, ópticas y químicas.

**Propiedades mecánicas.** relacionan la deformación con la fuerza aplicada. Las propiedades eléctricas donde el estímulo es una corriente o campo eléctrico. Las térmicas en cuanto al comportamiento térmico en capacidad calorífica y conductividad térmica. Las propiedades magnéticas son la respuesta de un material a un campo magnético. En las ópticas el estímulo es la radiación electromagnética o lumínica. Las propiedades químicas son la reactividad o reacción de un material frente a otras sustancias químicas. (Callister, 1995a)

Estas propiedades son importantes al saber el entorno en el cual se encontrará un material, así como su degradación ante el medio. Con lo anterior, se puede elegir un material idóneo que resista las condiciones de servicio, así como útil y factible.

Son aquellas relacionadas a un material y las fuerzas que se le aplican. Describen la forma en la que un material reacciona y soporta las fuerzas aplicadas. Entre estas propiedades encontramos: módulo de elasticidad, módulo de poisson, esfuerzo máximo a la tensión, esfuerzo máximo a la compresión.

Las propiedades mecánicas de los materiales se miden a partir de su respuesta cuando se le aplica, por ejemplo una fuerza. Para determinar valores de propiedades mecánicas se realizan pruebas de laboratorio,

donde se registra la fuerza aplicada, tiempo y temperatura entre otros factores.

**Propiedades físicas.** Se encuentran en relación a la excitación que sufre un material ante estímulos. Se subdividen en eléctricas, magnéticas, térmicas y ópticas.

**Propiedades químicas.** Se encuentran cuando el material reacciona en su estructura química ante otro material.

### 1.1 Clasificación de los materiales

- *Metales:* por lo regular son la aleación de dos o más elementos químicos metálicos. Poseen una estructura atómica cristalina ordenada y repetitiva. Tiene como características la buena conductividad térmica y eléctrica, resistencia alta a la rigidez, poseen ductilidad, conformabilidad, son tenaces por lo general con elevada resistencia mecánica y son opacos a la luz visible. Ejemplo de estos son el Cobre, aceros y Fierro fundido. Su estructura atómica se encuentra ordenada con un gran número de electrones deslocalizados que no pertenecen a algún átomo en concreto. Su proceso de producción por lo regular es el fundido o rolado en frío.

- *Cerámicos:* se componen químicamente de metales y no metales (óxidos, nitruros y carburos), entre los cuales se encuentran la arcilla, cemento y vidrio. (Callister, 1995a) Mantienen enlaces iónicos covalentes y su proceso de producción es mediante un tratamiento térmico a alta temperatura. Por lo regular se utilizan minerales como silicatos y Fierro. Pueden ser cristalinos o amorfos. Poseen una gran resistencia térmica y baja conductividad eléctrica, gran dureza, resistencia a la compresión y a la corrosión. Son frágiles por lo cual pueden quebrarse o romperse con cargas de impacto bajas.

- *Polímeros:* significa muchas partes. Son materiales formados por la repetición de partes o segmentos llamados monómeros, los cuales se entrelazan para formar cadenas gigantes llamadas polímeros (mediante un proceso de polimerización). Un polímero es una sustancia compuesta de macromoléculas. Una macromolécula es una molécula de alta masa molecular, cuya estructura está formada esencialmente por una repetición de unidades moleculares de baja masa molecular (McNaught, A.D. & Wilkinson, A., 1997). Son sumamente variados en sus propiedades, por lo que estas se deben estudiar dependiendo la familia y tipo de polímero, pero en general son flexibles con densidad baja y aislantes eléctricos.

- *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.

También existen los nanomateriales que se encuentran en una escala menor a 100 nm.

## 1.2 Polímeros

La palabra polímero significa muchas partes. Están constituidos por moléculas grandes formadas por gran número de unidades químicas enlazadas entre sí. El polietileno, por ejemplo, que se obtiene a partir del monómero etileno, está constituido por unidades monoméricas.

La estructura química de los polímeros, a pesar de su gran tamaño, es muy sencilla, y no es diferente de la de las moléculas pequeñas, la unión de las moléculas que los componen se realiza mediante enlaces covalentes, pudiendo contener también enlaces iónicos o fuerzas de interacción intermoleculares.

Según su origen se pueden clasificar en naturales o sintéticos. Los naturales, también llamados biopolímeros, son producidos de forma natural y no de manera sintética por los seres humanos. Algunos ejemplos son el caucho, celulosa y proteínas como la seda.

En cambio, los polímeros sintéticos son producidos por los seres humanos para crear objetos. Los polímeros sintéticos, son producidos a partir de derivados del petróleo o gas natural.

Los polímeros también se pueden clasificar por la constitución de sus cadenas moleculares en homopolímeros o copolímeros. Los homopolímeros están formados por unidades monoméricas idénticas, como en el caso del polietileno. Su unidad monomérica es  $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$  = A. Por lo tanto, el polímero es  $-\text{AAAAAAAAAA}-$ .

En cambio, los copolímeros son polímeros compuestos de unidades repetitivas distintas que se pueden unir de diferentes formas mediante enlaces químicos.

También se pueden clasificar en orgánicos o inorgánicos. Los orgánicos que son la mayoría, suelen estar formados por átomos de Carbono, también, se suelen presentar elementos como el H, O, N, S y halógenos. Los polímeros

inorgánicos tienen cadenas principales de Si, P, S, como es el caso de las siliconas (Martín Piris et al., 2012).

Los polímeros inorgánicos se dividen en naturales y sintéticos. Entre los naturales se encuentran las arcillas, rocas, arenas, cerámicos, diamante y grafito. Entre los sintéticos la fibra de vidrio, cerámicos sintéticos y el carburo de silicio.

Otra clasificación de los polímeros es en naturales y sintéticos. Entre los naturales se encuentran las proteínas, ligninas, carbohidratos, melaninas, ácidos nucleicos, y materiales como los de la telaraña. Entre los sintéticos se encuentran los polímeros procesados a partir de los hidrocarburos como las poliamidas, olefinas, poliuretano y poliésteres.

**Polímeros.** También se pueden clasificar por su comportamiento termodinámico. Los termoplásticos se comportan de forma dúctil y plástica. Se procesan (lo pueden realizar en varias ocasiones) al elevar el material a su temperatura (o posterior) de fusión. Al ser calentados se ablandan. Cuando se llega a la suficiente elevación de temperatura se conforman por su flujo viscoso, por lo tanto, pueden ser reciclados.

**Polímeros termoestables.** Tienen cadenas entrecruzadas con redes tridimensionales. Suelen ser más resistentes que los termoplásticos y a diferencia de estos es difícil reprocesarlos una vez que ha ocurrido la formación de sus enlaces entrecruzados (Askeland et al., 2017). Por último, los elastómeros tienen una amplia capacidad de deformación elástica sin cambio de forma permanente. Este tipo de polímeros, tienen enlaces cruzados que forman cadenas tridimensionales. Suelen ser más frágiles que los termoplásticos. No cuentan con temperatura de fusión fija y es difícil reprocesarlos.

**Polímeros elastómeros.** Tienen una menor cantidad de enlaces cruzados. Se caracterizan por poseer una gran capacidad a la deformación elástica.

El conocimiento sobre los polímeros es fundamental para comprender su comportamiento, procesamiento y propiedades, lo cual, lleva a encontrar su aplicación dentro de la construcción y en campos específicos como lo es las cubiertas de gran claridad. Con ello, se puede visualizar un proceso desde el reciclaje, procesamiento industrializado, proyecto, construcción y posibles alternativas de uso posterior.

### 1.3 Termoplásticos

Son una rama de los polímeros, clasificados por su comportamiento ante el calor el cual afecta sus propiedades mecánicas. Al llegar a la temperatura de fusión se ablandan, entran en un estado semilíquido donde pueden ser conformados debido a su flujo viscoso. Al enfriarse lo suficiente adoptan un

estado sólido. Los termoplásticos se distinguen de los termoestables y elastómeros por su capacidad de re conformarlos ante la acción del calor (reciclaje) (Askeland et al., 2017).



Figura 1. Enlaces covalentes.

**Nota:**

Enlaces covalentes del monómero etileno, para la formación de cadenas que forman el polietileno.

**Fuente:**

Askeland, Donald R., Wendelin J. Wright, D.k. Bhattacharya, R. P. Chhabra, Lorena Peralta Rosales, y Donald R. Askeland. 2017. Ciencia e ingeniería de materiales.

La siguiente clasificación separa a los termoplásticos según su estructura molecular, determinada por la ciencia de materiales.

**Amorfos.** Sus cadenas moleculares están ampliamente ramificadas con cadenas laterales largas, carece de orden estructural. Son transparentes en estado natural, elásticos o plásticos. Los polímeros amorfos presentan diferentes comportamientos físicos y mecánicos, entre ellos. A bajas temperaturas los polímeros amorfos son duros y vítreos. Cuando se eleva la temperatura, ocurre la transición vítrea. La temperatura de transición vítrea se define como la temperatura a la que el polímero se ablanda debido a la aparición de movimiento molecular coordinado de largo alcance, característico de los polímeros amorfos (Sperling, 2005).

**Cristalinos.** Contienen poca ramificación, así como cadenas laterales cortas, con regiones que presentan un alto grado de orden. Es importante mencionar que no se produce una cristalización completa debido a la longitud de sus cadenas. No son transparentes. Ejemplo de este material son las olefinas de las cuales forma parte el polietileno de alta densidad.

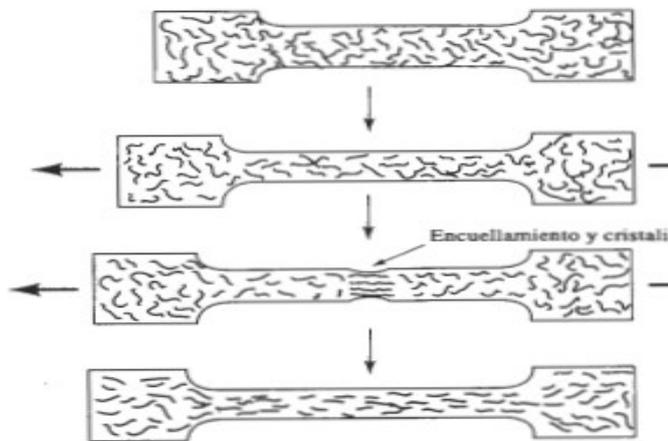


Figura 2. Ejemplo de estricción.

**Nota:**

Figura tomada de D. R. Askeland, Ciencia e ingeniería de materiales.

En estos polímeros la energía de activación y la viscosidad son bajas, se deforma con esfuerzos reducidos con altas temperaturas, al aplicar un esfuerzo constante sufre deformación (sin valor constante), donde debido a la baja viscosidad la deformación continúa incrementándose con el tiempo conforme las cadenas se deslizan al lado de la otra, lo cual se conoce como termofluencia. Los termoplásticos al alcanzar una temperatura de fusión  $T_F$  se encontrará en un estado fundido.

Los polímeros nunca son totalmente cristalinos, debido a que contienen regiones amorfas que se enlazan con otras cristalinas. Ante un esfuerzo continuo las cadenas de enlace se desenmarañan o se rompen, causando la falla. La temperatura de fusión y en si la temperatura del medio en el cual se encuentran influye directamente en las propiedades del material. Muchos de los polímeros se cristalizan al enfriarse por debajo de la temperatura de fusión. La densidad tiene un amplio aumento cuando las cadenas moleculares se reorganizan de una forma compacta y ordenada (Askeland et al., 2017).

EL grado de cristalinidad depende de la estructura molecular. Por ejemplo, el polietileno de alta densidad, debido a su simplicidad y alta regularidad de sus cadenas, es capaz de alcanzar hasta un 90% de cristalización (Reinhart, T.J., 1990). Un enfriamiento lento permite que la cadena molecular se encuentre alineada.

En los polímeros cristalinos se cuenta con zonas cristalinas de alto orden, con zonas amorfas, en la región cristalina las cadenas son plegadas y con alto orden, las cuales son llamadas lamelas, las cuales forman cadenas. Los esferulitos son regiones de formación esférica que contienen lamelas y zonas amorfas.

La cristalinidad se define como la fracción en peso de fase cristalina presente en la masa polimérica. Las cristalitas de los polímeros son muy pequeñas y normalmente se organizan en estructuras piramidales más grandes y de poco espesor llamadas esferulitas, que pueden ser vistas sin ayuda del microscopio, o como estructuras en cruz de Malta con luz polarizada, y prismas cruzados si se usa un microscopio.

Como en la mayoría de los procesos de cristalización, si no hay nucleación existe un periodo de inducción durante el que se desenredan las cadenas; este proceso viene seguido de un crecimiento cristalino lento. Sin embargo, la velocidad de cristalización aumenta y luego disminuye cuando se acerca al final del proceso de cristalización.

Las zonas cristalinas pueden alterarse mediante métodos de procesado como el termoformado y la extrusión de los plásticos o la orientación biaxial y el hilado en frío de fibras. En el último método, el cual explica los otros, las cristalitas se ordenan en la dirección de los esfuerzos, el hilo disminuye en diámetro, y reabsorbe calor como resultado de la orientación y cristalización adicionales.

Para los polímeros que se cristalizan en masa, el resultado final es normalmente la formación de esferulitas. En el caso del polietileno, la estructura que se forma inicialmente es un cristal sencillo con láminas de cadena plegada; esto conduce rápidamente a la formación de estructuras en forma de haz, las cuales se llaman axialitas o hedritas; a medida que se desarrolla el crecimiento, las láminas se desarrollan a los dos lados de un plano central de referencia. Las láminas continúan su expansión ocupando secciones cada vez mayores mediante la formación de más láminas en puntos de ramificación apropiados. El resultado es la formación de esferulitas.

En general puede decirse que todo defecto que reduzca la regularidad constitucional de la cadena afecta negativamente a la cristalinidad, los factores determinantes de la cristalinidad son:

Copolímeros: la cristalinidad disminuye con la copolimerización, siendo este efecto mayor cuanto más diferentes sean las constituciones de los copolímeros.

Tamaño: la cristalinidad disminuye con el peso molecular.

**Configuración:** la cristalinidad está estrechamente vinculada a la estereorregularidad, hasta el punto de que la ausencia de tacticidad suele ser sinónimo de carácter amorfo.

**Ramificaciones:** la presencia de ramas disminuye la cristalinidad, siendo el efecto más pronunciado cuanto más irregulares sean éstas (Sperling, 2005).

A demás de las propiedades tratadas anteriormente que son inherentes a todos los materiales sólidos con diferentes magnitudes según su composición, existen propiedades específicas relacionadas a los termoplásticos que los diferencian de las demás familias de materiales

**Viscoelasticidad.** En la región elástica el esfuerzo y la deformación están directamente relacionados. En condiciones de altas temperaturas o cargas aplicadas de manera lenta el material se comporta como un fluido viscoso. El comportamiento viscoelástico de los polímeros propicia que al retirar una carga a la cual este sometido un polímero se recupere de forma instantánea de la distorsión. Los segmentos sometidos a cargas volverán a su forma original, después de horas o meses (Askeland et al., 2017). Por lo tanto, se concluye de nueva cuenta que las propiedades mecánicas de los termoplásticos deben ser estudiadas con la consideración de la carga aplicada, en un tiempo y temperatura determinadas. Los cambios en las anteriores condiciones propician comportamientos y valores de resistencia diferentes.

**Temperatura de degradación  $T_d$ .** Los enlaces que unen a los polímeros (como los covalentes), pueden destruirse, quemarse o carbonizarse, debido a altas temperaturas, radiación UV, exposición al Oxígeno, ataque de bacterias o bajas temperaturas.

**Temperatura de fusión  $T_m$ .** Es la temperatura a la cual un polímero termoplástico fluye y puede ser utilizado para el proceso de conformación. Al alcanzar esta temperatura o superarla el polímero tiene un estado semi líquido viscoso. Los enlaces de sus cadenas son débiles, de aplicarse fuerza a las cadenas se desliza una contra otra y el polímero fluye casi sin deformación elástica. La resistencia y el módulo de elasticidad son cercanos a cero, por lo que se puede conformar el polímero (Askeland et al., 2017). En el polietileno de alta densidad es de 137 °C.

Por debajo de la temperatura de fusión, las cadenas de polímeros siguen retorcidas y entrelazadas. Estos polímeros tienen una estructura amorfa. Justo por debajo de la temperatura de fusión, el polímero se comporta de manera similar al caucho; cuando se le aplica un esfuerzo ocurre tanto la deformación elástica como plástica. Al eliminar el esfuerzo, se recupera rápidamente la deformación elástica, pero el polímero ha quedado

deformado permanentemente por el movimiento de las cadenas.

**Temperatura de transición vítrea  $T_g$ .** Por debajo de esta el polímero se hace duro y frágil como el vidrio. En el polietileno de alta densidad se presenta a los  $-120\text{ }^\circ\text{C}$ . Los polímeros vítreos tienen poca ductilidad y conformabilidad. También, poseen alta tenacidad, rigidez y resistencia a la termofluencia. La temperatura de transición vítrea es comúnmente de 0.5 a 0.75 veces la temperatura de fusión absoluta  $T_m$  (Askeland et al., 2017). La movilidad molecular por encima de esta temperatura es más rápida al aumentar la temperatura, por lo cual se puede producir con mayor facilidad el proceso de degradación.

Si un termoplástico se halla a una temperatura inferior a  $T_g$ , se encuentra en estado vítreo, este estado se caracteriza por la rigidez y fragilidad del material. Cuando el polímero se halla a una temperatura superior a la  $T_g$  se encuentra en estado amorfo, que se caracteriza por una baja rigidez y mayor flexibilidad y ductilidad.

Por encima de la  $T_g$  los enlaces secundarios de las moléculas son mucho más débiles que el movimiento térmico de las mismas, por ello el polímero se torna gomoso y adquiere cierta elasticidad y capacidad de deformación plástica sin fractura. Este comportamiento es específico de polímeros termoplásticos y no ocurre en polímeros termoestables.

**Temperatura de cristalización  $T_c$ .** Es la temperatura a la cual un polímero comienza su retorno al estado sólido tras haber sido calentado a una temperatura de fusión. Al regresar al estado sólido el polímero puede ser utilizado.

**Relajación de esfuerzo.** En un polímero sujeto a una deformación constante, las cadenas fluyen de manera viscosa lo cual reduce el esfuerzo del material. Este fenómeno es consecuencia del comportamiento viscoelástico de los polímeros. Un claro ejemplo son las bandas elásticas que se encuentran tensas al rodear un objeto, pero tras el paso del tiempo ya no se encuentran igual de tensas.

**Resistencia al impacto.** A muy altas velocidades de deformación no se causa deformación plástica. A bajas temperaturas el material se vuelve frágil, en condiciones de altas temperaturas es dúctil. Lo anterior explica el comportamiento frágil y valores pobres a bajas temperaturas y dúctil a altas.

**Esfuerzo a la tensión.** Las regiones cristalinas entre las amorfas, que son como laminillas se deslizan y se separan. Ante el esfuerzo las cadenas de enlace se desenmarañan o se rompen, lo cual provoca la falla.

**Ramificación.** Ocurre cuando un átomo unido a la cadena lineal principal

es eliminado y remplazado por otra cadena lineal. Un ejemplo es la relación de ramificación entre el polietileno de alta densidad y el de baja, donde este último tiene más ramificaciones que el anterior, lo cual reduce la tendencia a la cristalización, la resistencia y la rigidez, la densidad disminuye.

**Cristalización.** Esta aumenta la densidad, resistencia al ataque químico, así como las propiedades mecánicas y a altas temperaturas, debido a la fuerte unión entre sus cadenas.

**Formación de mezclas y aleaciones.** Es posible mejorar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales termoplásticos mediante mezclas y aleaciones. Un ejemplo es el ABS donde el elastómero no se introduce como copolímero, pero ayuda a absorber energía y mejorar la tenacidad. Las cabinas transparentes para aeronaves son formadas mediante el endurecimiento por elastómeros.

**Resistividad y rigidez dieléctrica.** Los polímeros en su mayoría son aislantes eléctricos, debido a que sus electrones se encuentran en los enlaces covalentes y no dan lugar a la corriente eléctrica. El Polietileno es uno de los polímeros más utilizados como aislante eléctrico debido a su resistencia al envejecimiento, al agua y elevada resistividad. Cuando el campo eléctrico supera los 100 Kv, se produce la descarga eléctrica, por lo tanto, la ruptura dieléctrica y el material se vuelve conductor. El valor del campo eléctrico al cual se produce la rotura dieléctrica depende del espesor del material (se expresa en Kv), a lo cual se le denomina rigidez dieléctrica.

**Comportamiento elástico de los polímeros.** En los polímeros termoplásticos la elasticidad es resultado de la distorsión de los enlaces covalentes de sus cadenas lo cual, permite que exista una deformación elástica. Cuando se elimina el esfuerzo, los segmentos completos regresan a su estado inicial.

Este comportamiento elástico, dependiente del tiempo puede contribuir en algo al comportamiento elástico no lineal.

Se puede dar un comportamiento elástico lineal el cual sirve para determinar el módulo de elasticidad. También, un comportamiento elástico no lineal, que se produce tras una carga continua en tiempo determinado, posterior al límite elástico lineal y comienzo del comportamiento plástico.

**Comportamiento plástico de los polímeros.** En los polímeros existe la deformación plástica cuando se supera el esfuerzo de cedencia, sin embargo, esta deformación no es resultado de un movimiento de dislocación. Las cadenas se estiran, giran, se deslizan y se desenmarañan bajo la carga, causando deformación permanente, debido a esto, se puede explicar la reducción de esfuerzos más allá del punto de cedencia. Cuando existe un esfuerzo suficientemente alto, las cadenas empiezan a

desenmarañarse y a enderezarse, también ocurre la estricción del material.

**Termofluencia.** En los polímeros se pueden observar curvas de esfuerzo-ruptura; con ayuda de este tipo de estudios es posible determinar el tiempo de servicio antes de que falle un componente para un esfuerzo aplicado y una temperatura de operación conocidos.

Otro método para representar datos de termofluencia consiste en medir la deformación en función del tiempo y del esfuerzo aplicado. Al predeterminar el esfuerzo máximo permisible durante la vida útil del polímero, es posible calcular el esfuerzo máximo aplicado.

**Deformación.** Al aplicar un esfuerzo las regiones cristalinas del polímero se extienden hacia las regiones amorfas. Dichas regiones cristalinas se deslizan dentro de las esferulitas, empiezan a separarse y estirarse. Los dobleces entre laminillas se inclinan y alinean en dirección de la carga de la tensión. Las laminillas cristalinas se subdividen en unidades más pequeñas, deslizándose una al lado de otra, hasta que finalmente el polímero queda formado por pequeños cristales alineados, unidos por cadenas de enlace y orientados paralelamente a la carga de tensión. Las esferulitas también cambian de forma y se alargan en dirección al esfuerzo aplicado. Cuando la carga es continua y se produce la falla las cadenas moleculares se desenredan y rompen.

**Micro cavidades.** Cuando se aplica un esfuerzo las micro cavidades aparecen en sentido perpendicular al esfuerzo, éstas oquedades, pueden crecer y seguir soportando el esfuerzo.

El proceso es semejante al de la deformación plástica del polímero, pero éste puede avanzar incluso ante un bajo esfuerzo, a lo largo de un periodo prolongado.

El crecimiento de la zona de micro cavidades incrementa el esfuerzo en sus extremos, creando nuevos huecos y extendiendo la región de micro cavidades como la grieta; finalmente la grieta llega a un tamaño que le permite su propagación rápida, causando la fractura. (Askeland et al., 2017)

**Densidad.** Se define como la relación entre la masa y el volumen de una sustancia. La densidad aparente es una magnitud aplicada en materiales de constitución heterogénea, y entre ellos, los porosos como el suelo, los cuales forman cuerpos heterogéneos con intersticios de aire u otra sustancia, de forma que la densidad total de un volumen del material es menor que la densidad del material poroso si se compactase.

## 1.4 Polietileno de alta densidad

Es un termoplástico, que cuenta con diferentes variedades según su densidad: baja densidad (0.910–0.925 g/cm<sup>3</sup>), media densidad (0.926–0.940 g/cm<sup>3</sup>), alta densidad (0.940 g/cm<sup>3</sup>), ultra alta densidad (0.970 g/cm<sup>3</sup>).

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

La resistencia a la degradación UV del PEAD 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 puede incluir un agente reforzante, el cual mejore sus propiedades mecánicas y permitan su incorporación en un sistema estructural.

El reciclaje de circuito abierto de envases de PEAD para producir madera plástica es una ventaja. Las aplicaciones de embalaje de un solo uso, como los envases, son una excelente 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).

## 1.5 Procesos de producción de polímeros termoplásticos

El PEAD reciclado se puede producir según los mismos procesos de los polímeros termoplásticos vírgenes, se abordará a profundidad el proceso de extrusión e inyección por ser los más apropiados para los objetivos de producción de un perfil estructural, sin dejar de lado los demás procesos que se podrían utilizar para paneles, bloques o demás piezas que sean útiles en la construcción dentro de la arquitectura.

Proceso de extrusión: se trata de un proceso continuo de componentes en forma de tubo o placas. Es utilizado para la producción de plásticos compuestos y la combinación con aditivos. Se coloca el material reciclado en la tolva la cual la transporta al extrusor combinado con la unidad de calentamiento, posteriormente pasa a la unidad de enfriamiento la cual

rocía con agua el material a modo de lavado, para finalizar en la de corte. Es sumamente importante mencionar que la forma del material se da mediante un cabezal de salida.

Es importante tener en cuenta que en este proceso la sección que se tiene como resultado puede ser ligeramente diferente a la forma de la boquilla debido al hinchamiento post extrusión que se produce al no mantener al material sujeto a una forma fija durante un mayor periodo de tiempo.

La coextrusión también resulta una posibilidad para la producción de plásticos, mediante dos extrusoras que convergen en un punto para dar como resultados materiales de múltiple capa (Pérez González et al., 2015).

**Proceso de inyección.** La inyección resulta ser un proceso adecuado para la producción de perfiles estructurales de plástico, además de ser una de las maneras más comunes de producción. Cuenta con una tolva de alimentación, donde se introducen el material reciclado, así como los compuestos de refuerzo. Posteriormente el material se calienta en un cilindro que contiene un husillo o tornillo sin fin el cual transporta a presión y alta temperatura el material homogeneizado, inyectando este en un molde el cual es la diferencia entre el anterior proceso, por lo cual se mantiene una forma fija y se tienen mayores posibilidades de formas. También se tiene la virtud de un alto volumen y precisión de producción, lo cual resulta en un proceso altamente versátil exitoso y económico tanto para piezas pequeñas como grandes.

El proceso de co-inyección puede proporcionar gran número de resultados, este proceso es utilizado en los plásticos reciclados, donde se produce un emparedado donde se encapsulan los materiales y se puede proporcionar un recubrimiento adecuado para la función necesaria. La máquina para este proceso tiene dos cilindros de inyección que alimentan a un dado en común, proporciona la ventaja de tener núcleos contaminados o con diversos materiales reciclados y una piel virgen. Tal procedimiento funciona mejor si el núcleo es más viscoso que la piel exterior.

**Moldeo por soplado.** Es utilizado para producir artículos huecos, es posible combinarlo con la inyección y la extrusión. El proceso por inyección soplado es utilizado para envases de refresco y el extrusión-soplado para envases de detergentes y botellas de leche. En este caso también es necesario que el núcleo posea mayor viscosidad que las capas subsecuentes. Se deben cumplir con las siguientes características en para la producción de plásticos por sopado: - deben tener viscosidad adecuada –deben tener alta resistencia a la fusión –deben ser ampliables al inflar (lo que a menudo se conoce como relación de inflación de material) –Deben poder sellar en la base de la moldura.

Como conclusión este proceso no es adecuado para las necesidades para la producción de perfiles estructurales a base de PEAD reciclado.

**Moldeo por compresión.** Este proceso se puede utilizar para termoplásticos y termofijos, el molde se carga con el plástico, es cerrado, se aplica compresión y calor, la cual causa que el plástico se adapte a la forma del molde, finalmente el molde se abre y el objeto producido es expulsado. En este caso a diferencia de los anteriores procesos se puede utilizar materia prima en forma de lámina, lo cual causa mayores costos de producción. Un ejemplo de los anteriores materiales es la esterilla de vidrio que consiste en polipropileno con altos niveles de fibra de vidrio. (Goodship, 2007)

**Termoformado.** Al igual que en el anterior caso se utilizan láminas. Se calienta el molde sin el calor necesario para derretir el plástico. Posteriormente se pone en contacto al molde con el plástico, finalizando con el recorte de los excesos los cuales se reutilizan en un nuevo proceso de producción de láminas.

La espuma de poliestireno y el polietileno son comúnmente utilizados en este proceso para producir cajas, platos y vasos.

**Moldeo por intrusión.** Es adecuado para plásticos mixtos, los cuales se muelen bien antes de los procesos para evitar la dispersión. Utiliza la extrusión para ablandar la materia prima, introducirla en un molde y finalmente enfriarla. Se finaliza con la expulsión o el retiro directo desde el molde. El proceso es tolerante a los contaminantes como plásticos mixtos, arena, vidrio, madera y papel. Este proceso generalmente es utilizado para la producción de piezas largas, geométricamente simples, como perfiles y paneles que remplazan a la madera y tienen aplicación en cercas, postes y andamios (Goodship, 2007)

**Moldeo por transferencia.** Combina los procesos de inyección y por compresión, el material se transfiere a un molde mediante un hueco de inserción, donde a su vez se aplica presión para tomar la forma del molde. El resulta es producto de la transferencia a un molde el cual se cierra y el material de moldeo se transfiere por una acción compresiva.

El material se alimenta desde una tolva de masa fundida al barril de calentado donde es homogeneizado y plastificado. Luego se alimenta a un acumulador de masa fundida que mide el peso del material a baja presión en un molde parcialmente abierto. Al ser llenado la prensa cierra el molde el material es comprimido. Cuando el objeto se enfría y tienen estabilidad dimensional se retira.

Las fuerzas requeridas hacen que este proceso sea más económico que el moldeo por inyección convencional. Sin embargo, no es factible para piezas

complejas. Este proceso se puede aplicar a plásticos mezclados previamente o sin mezclar y permitir la contaminación por ejemplo con partículas metálicas, según la máquina lo tolere.

**Moldeo por síntesis.** Puede ser utilizado con una amplia variedad de plásticos mixtos. El proceso es tolerante a la contaminación por materiales como Aluminio, papel y virutas de madera. Es utilizado para la fabricación de materiales para el embalaje o el aislamiento acústico.

Los materiales pasan por un detector de metales para eliminar grandes fragmentos. El material triturado pasa por una torre donde se calienta el material que pasa de arriba hacia abajo. La presión de compresión aumenta conforme avanza más el molde. Los moldes inferiores se enfrían con el aire del ambiente, los cuales posteriormente se calientan con un radiador y se conducen en contraflujo del descenso de los moldes. La ventaja es que no se requiere limpieza de materiales, de igual manera en comparación con los demás procesos.

**Pultrusión.** Es un proceso automatizado para producir perfiles con refuerzo de fibras orientadas, también llamados perfiles pultrusionados o perfiles RFV. En este proceso de fabricación continua, se produce un perfil mediante la combinación específica de refuerzos de fibra y polímeros sean termoplásticos o termofijos (comúnmente)

**Manual en molde abierto.** Es un proceso en el cual se adicionan capas de fibra de refuerzo las cuales son adheridas al material base, mediante resinas termofijas como vinil éster o poliéster en un molde abierto, ya sea a mano o mediante sistemas robotizados.

**Extrusión y soplado.** Es un proceso que incorpora la extrusión en un molde al cual se le aplica la técnica de soplado, para producir, botellas, empaques o películas. Al conformar el material y quedar enfriado se retira del molde

**Rotomoldeo.** Es una técnica de procesamiento de polímeros que permite obtener piezas huecas de grandes tamaños. se introduce un polímero en estado líquido o polvo dentro de un molde y este, al girar en dos ejes perpendiculares entre sí, se adhiere a la superficie del molde, creando piezas huecas.

**Calandrado.** El material es calentado por debajo de su temperatura de fusión, pero por encima de la temperatura de transición vítrea. Posteriormente, rodillos lo comprimen hasta alcanzar un espesor requerido. Finalmente, el material se enfría o se transporta a una embobinadora para ser enrollado.

### **Aditivos en los polímeros.**

- Rellenos: se agregan con para mejorar propiedades de los polímeros como es el caso del carbonato de calcio, sílice, talco y arcilla.
- Pigmentos: se agregan para proporcionar color, como el  $TiO_2$
- Estabilizadores: protegen al polímero de los efectos de su entorno, como la radiación UV y demás efectos de la intemperie.
- Agentes antiestáticos: los polímeros a pesar de no ser conductores pueden acumular carga estática por electricidad. Estos agentes atraen la humedad del aire lo que provoca la generación de chispas o descargas
- Retardantes de llama: los polímeros tienen el defecto de ser inflamables. Aditivos a base de Cloro, Bromo, Fósforo o sales metálicas reducen la inflamabilidad y la extensión de la combustión.
- Plastificantes: reducen la temperatura de transición vítrea.
- Reforzantes: se refiere a fibras para formar materiales compuestos reforzados mediante estas. Se forma una matriz de polímero y una fase discontinua <sup>1</sup>, la cual tiene como objetivo el mejorar las propiedades mecánicas, como la resistencia a la flexión, tensión y compresión. Ejemplo de estos materiales son la fibra de aramida, fibra de vidrio, fibra de Carbono, virutas de madera entre otros.
- Agentes compatibilizantes: con estos agentes se pueden producir mezclas estables de polímeros inmiscibles. Estos, permiten la dispersión de una fase en una matriz polimérica, lo cual, mejora la estabilidad contra la separación de las fases y se mejoran las propiedades mecánicas del compuesto. El anhídrido maleico (MAH), ha sido utilizado para hacer compatibles mezclas de polímeros inmiscibles, así como, fibra de vidrio y polímeros termoplásticos. Se ha realizado la compatibilización mediante la mezcla de 1.5 g de MAH y 0.1 g de BPO por cada 100g de PEAD agregado una mínima cantidad de acetona anhidra, se agitó, y se dejó evaporar la acetona para que el MAH quedara adherido a los gránulos del polímero (Neri Del Castillo, 2013).

El anhídrido maleico, ha sido ampliamente utilizado como un monómero en la modificación de poliolefinas. Injertado en estas ha mostrado gran importancia como compatibilizante en la modificación de polímeros, como promotores de adhesión para polímeros, y como agentes de enlace para polímeros y metales.

También, ha mostrado el aumento en las propiedades mecánicas de las poliolefinas, como la resistencia a la tensión y la adherencia con los metales (Álvarez Lara, 2011).

## 1.6 Materiales compuestos

Se define a un material compuesto como la combinación macroscópica de dos o más materiales para obtener propiedades que individualmente no tendrían sus componentes. Constan de una fase continua o matriz que tiene como función aglutinar para formar una estructura monolítica y también es responsable de la resistencia térmica y ambiental del material (Askeland et al., 2017). También consta de una fase discontinua o refuerzo que como su nombre lo indica refuerzan o potencian las propiedades del compuesto. Por ejemplo, la fibra de vidrio es un material compuesto, que consta de vidrio en filamento imbuido dentro de un material polimérico. Este compuesto debido a sus propiedades es diseñado para que el vidrio provea resistencia mecánica y el polímero flexibilidad.

Los materiales compuestos se dividen en tres categorías según su refuerzo: con partículas, con fibras y laminares. El concreto es una mezcla que puede incluir cemento y grava, este es un compuesto reforzado por partículas; la fibra de vidrio mencionada anteriormente es un compuesto reforzado por fibra y la madera contrachapada (también conocida como triplay, que tiene capas alternas de láminas de madera) es un compuesto laminar. Los compuestos reforzados por fibras pueden ser anisotrópicos o isotrópicos, por partículas cuando estas se distribuyen de manera uniforme tendrán propiedades isotrópicas, mientras que los laminados siempre tienen comportamiento anisotrópico (Martin Piris et al., 2012)

La isotropía es la característica de algunos cuerpos cuyas propiedades físicas no dependen de la dirección en que son examinadas. Es decir, se refiere al hecho de que ciertas magnitudes vectoriales conmensurables dan resultados idénticos independientemente de la dirección escogida para dicha medida.

La anisotropía es la propiedad general de la materia según la cual cualidades como elasticidad, temperatura, conductividad, velocidad de propagación de la luz, etc., varían según la dirección en que son examinadas. Algo anisótropo podrá presentar diferentes características según la dirección.

Los materiales compuestos también se pueden clasificar de acuerdo a su matriz, ya sea cerámica la cual presenta complejidad de producción industrial.

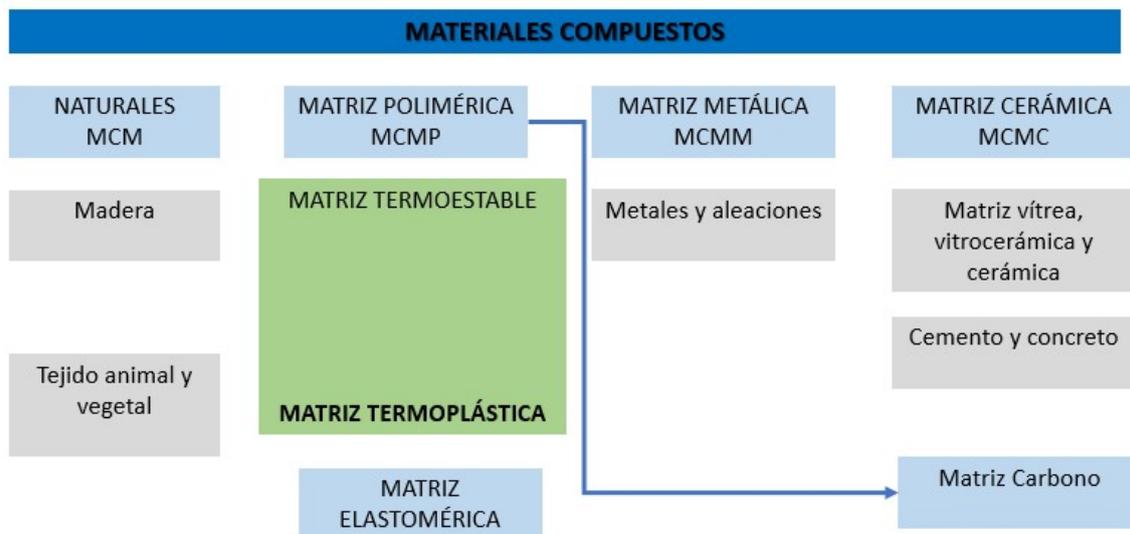


Figura 3. Clasificación de los materiales compuestos

**Nota:**

Diagrama para la clasificación de los materiales compuestos por su matriz.

**Fuente:**

Interpretada de ciencia de materiales para ingenieros.

**Matriz o fase continua.** La matriz mantiene a los refuerzos (en este caso fibras), dentro de su lugar, permite que estas desempeñen su función estructural al transmitir las cargas hacia estas y entre ellas, provee de protección al medio ambiente, proporciona resistencia al agrietamiento y cortaduras. La matriz es la parte del material compuesto que aglutina a todos los componentes.

**Reforzados por partículas.** Son aquellos reforzados por partículas que van de los 10 a los 250 nm, las partículas suelen ser más duras y rígidas que la matriz, impiden el movimiento de esta en sus proximidades. Producen un pronunciado efecto de endurecimiento a pesar de no ser coherentes con la matriz. Este tipo de materiales tienen aplicación en la industria eléctrica y electrónica para mejorar la conductividad.

**Reforzados por fibras.** A un material compuesto se le refuerza mediante fibras para conseguir unas mejores resistencias mecánicas y una mejor relación resistencia-peso. La matriz en la cual se encuentran inmersas es blanda y dúctil, transfiere los esfuerzos a las fibras.

Es necesario tomar en cuenta factores respecto a las fibras como su orientación, cantidad, diámetro, longitud, propiedades y la unión entre matriz y fibra. Las fibras pueden ser cortas, largas o continuas, van desde los 10 hasta los 150 micrones. Una relación de forma (longitud entre diámetro) grande, mejora las propiedades del compuesto. La fabricación de fibras

con diámetro lo más pequeño posible reduce los defectos que puedan propagarse cuando el material está bajo carga.

A pesar de que un volumen mayor de fibras incrementa la resistencia del compuesto la relación aproximada que debe haber es del 80 % con motivo de que las fibras se encuentren rodeadas totalmente por la matriz. En el caso de las fibras dispuestas en una orientación aleatoria establecen su porcentaje dentro del compuesto entre un 20 – 40 % (Santiago et al., 2003a)

La orientación de las fibras cortas es aleatoria, pueden proporcionar un comportamiento relativamente isotrópico. La configuración unidireccional con fibras largas o con fibras continuas produce propiedades mecánicas anisotrópicas. Sin embargo, si la carga es perpendicular al sentido de las fibras, esta orientación unidireccional origina propiedades pobres. Lo anterior da una perspectiva al diseño de los materiales compuestos en base a la orientación de las fibras y relación entre su función y las cargas (Askeland et al., 2017).

Las fibras pueden ser cortas, largas o continuas. Las cortas por lo regular se encuentran dispuestas al azar, mientras que las largas y las continuas se pueden orientar en varias direcciones y ángulos.

*La relación de forma* mejora las propiedades de los compuestos cuando esta es grande ( $l/d$ ). La longitud crítica ( $L_c$ ) de una fibra es útil para su aplicación dentro de un material compuesto.  $L_c = \sigma_f d / 2\tau_i$

Donde:

$L_c$ : longitud crítica

$\sigma_f$  = resistencia de la fibra

$d$  = diámetro de la fibra

$\tau_i$  = resistencia de la unión entre la fibra y la matriz o esfuerzo al que la matriz se comienza a deformar.

El efecto es más reforzante cuando  $L_f \geq 15 L_c$

Los principales tipos de fibras son las de vidrio, sintéticas, aramidas y las de Carbono.

La unión entre las fibras y la matriz es importante para el correcto funcionamiento del compuesto y así permitir la transferencia de cargas y evitar la falla del material. Las fibras de vidrio se pueden recubrir con *silano* para mejorar la unión y la resistencia a la humedad. El silano ha demostrado una mayor adhesión entre el  $\text{CaCO}_3$  y el polipropileno (material con

estructura similar a la del PEAD) lo cual resultó en un mayor módulo de Young y un menor valor de alargamiento a la rotura (Demjén & Pukánszky, 1997).

**Compuestos reforzados estructurales (laminados y paneles sándwich).** Los compuestos laminados incluyen revestimientos delgados, superficies protectoras y laminados. Por lo general se aplican para tener alta resistencia a la corrosión, manteniendo su resistencia, ligereza y bajo costo. Para producirlos se utilizan métodos como la laminación, unión por explosión, co extrusión y soldadura.

Una variación de estos compuestos es el tipo emparedado, los cuales tienen capas delgadas unidas a un material de relleno ligero como alguna espuma de polímero. La celda interna de panel puede tener varias formas como hexagonal, cuadrada, rectangular o senoidal.

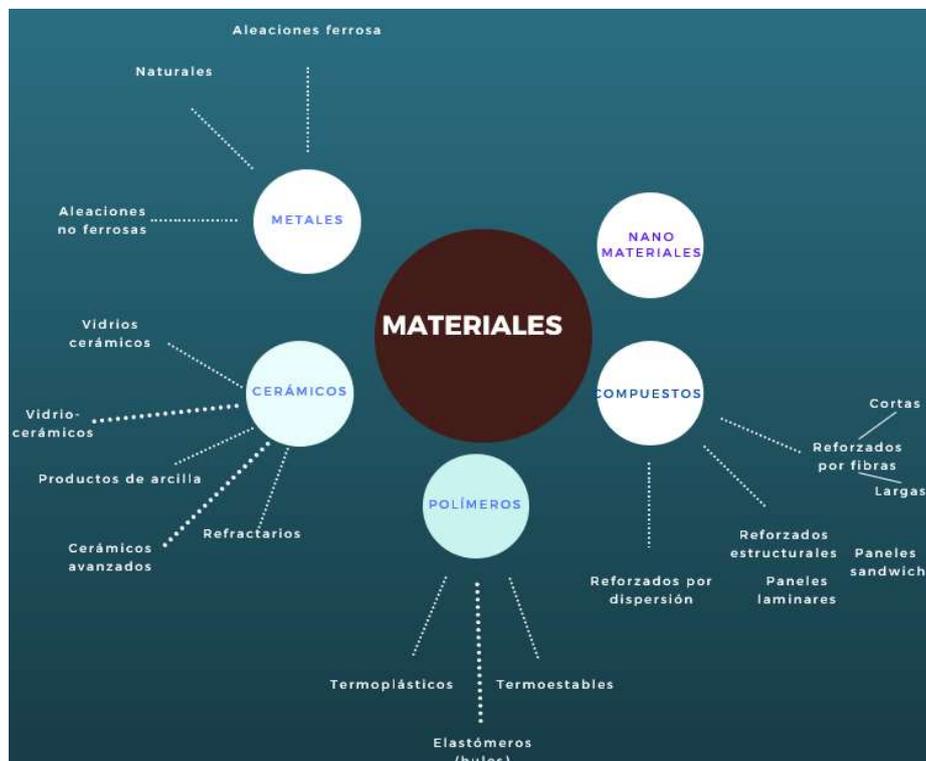


Figura 4. Clasificación de los materiales.

**Nota:**

Imagen 10 Clasificación de los materiales, de acuerdo a la ciencia e ingeniería de los materiales. Elaboración propia.

### Tipos de fibras

**Fibras sintéticas.** Son fibras poliméricas fibriladas a diferentes longitudes, según la finalidad. Las hechas a base de polipropileno y polietileno se utilizan para fibras geotextiles y como agregado en morteros.

Existe otra variedad de fibras, las cuales se fabrican como refuerzo de geotextiles.

Las fibras de poliéster se utilizan en la industria textil y como refuerzo de matrices termoplásticas, como el PVC.

**Fibras de Carbono.** Se obtiene a partir de una fibra llamada precursor, el cual puede ser PAN poliacrilonitrilo. Se pasa por partes sucesivas de tratamiento térmico e hilado. Calentamiento hasta 1000 ó 2000 °C, según el proceso de carbonización y grafitización. Previo a la grafitización, se obtienen fibras de Carbono con alta resistencia. Tiene como características una alta rigidez, bajo peso, alta resistencia, coeficiente de dilatación térmica muy bajo, baja resistencia al impacto y alto costo.

**Fibras de aramidias.** Se obtiene por la extrusión e hilado de las poliamidas aromáticas. La marca comercial Kevlar es conocida por la fabricación de estas fibras. Tienen como características: tener muy bajo peso, gran resistencia al impacto y a la tracción, baja resistencia a la compresión, escasa adherencia a las matrices termoplásticas, resistencia a agentes químicos y estabilidad mecánica entre -30 y 200 °C (Santiago et al., 2003a).

**Fibra de vidrio.** 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<sub>2</sub>. 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). Dentro de la clasificación de la fibra de vidrio sus propiedades pueden variar debido a su composición exacta.

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 fibrización 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  $\mu\text{m}$  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).

La capa que se aplica a la fibra de vidrio tiene grosor de unas cuantas decenas de nanómetros por lo general es un secreto industrial. El agua es un componente predominante.

Las fibras de vidrio picadas se producen de la siguiente forma: los hilos cortados se producen alimentando continuamente haces de filamentos de vidrio continuos a través de un cortador de vidrio giratorio. Las longitudes de corte varían para adaptarse a los requisitos de uso final, normalmente en el rango de 3 a 50 mm. Los hilos cortados se utilizan para reforzar tanto polímeros termoestables como termoplásticos.

son las más utilizadas en la construcción debido a su relación entre eficiencia y costo.

Comercialmente se presentan en las siguientes formas:

- *Tapetes de hilos cortados*: hilos cortados unidos entre sí mediante un ligante químico, como un aglutinante, emulsión en polvo o poliéster. Se utiliza en el proceso de moldeo por molde abierto en embarcaciones.

- *Tapetes de filamento continuo*: forman una tela no tejida aglomerada como una felpa. La fibra se mantiene unida por resina de poliéster insaturado. Es utilizado para laminados por compresión y en la pultrusión.

- *Roving*: bobinas de filamento o conjunto de hilos que han recibido una cubierta plástica.

- *Tejido*: son superficies entramadas formadas a partir del anterior tipo. Son recubiertos de un plastificante. Utilizados para aplicaciones estructurales como contenedores de transporte, armadura balística alas de aeronaves y puertas.

- *Hilos cortados*: son hilos con longitudes de 3 a 12 mm. Los denominados fibra larga, se utilizan para reforzar resinas epoxi, y poliéster, en seco en resinas fenólicas. Se utilizan en procesos de termocompresión e inyección. También, se refiere a los hilos cortados de fibra corta, la cual es utilizada como refuerzo en materiales termoplásticos como ABS, polipropileno, poliamida, poliestireno y PVC.

- *Fibra molida*: fibras trituradas en longitudes de 0.1 y 0.02 mm, que mantienen un diámetro entre 10 y 17 micras. Son molidos, para proporcionar una densidad específica a granel con una longitud promedio. Son recubiertos para hacerlos compatibles con resinas específicas.

La fibra de vidrio tiene las características de tener alta resistencia mecánica, aislante térmico, baja densidad, incombustibilidad, estabilidad dimensional, bajo costo, resistencia a ataque químico, alta dureza (Mariano, 2011).



Figura 5. Diagrama de fabricación para la fibra de vidrio E.

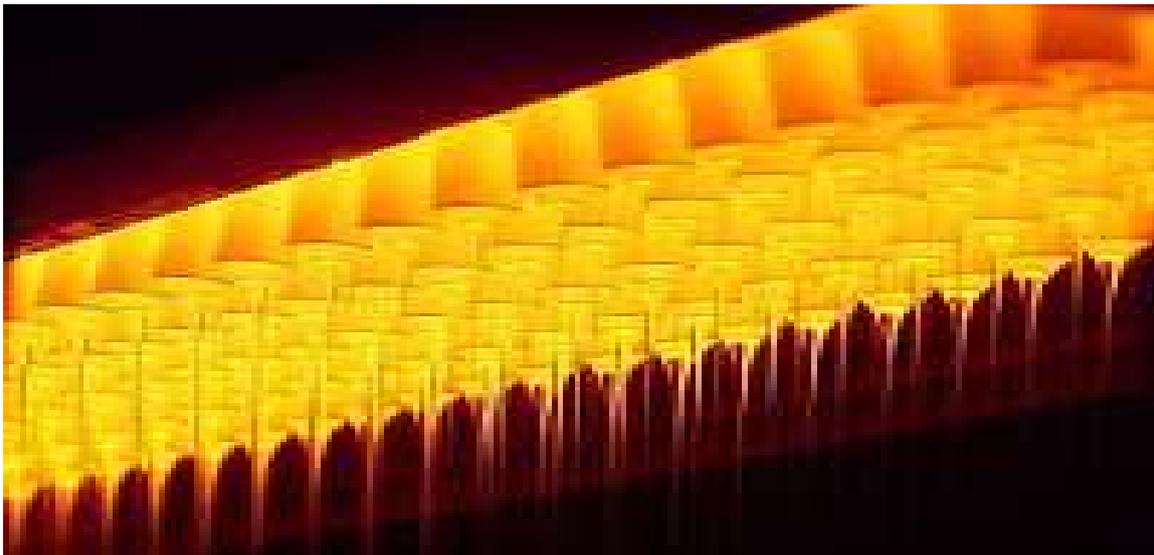


Figura 6. Fabricación de la fibra de vidrio.

**Nota:**

Salida del vidrio fundido de las boquillas.

**Fuente:**

Imagen tomada de <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/12/fibra-de-vidrio.html>

Los tipos de fibra de vidrio más comunes son los siguientes:

**Poliétileno de alta densidad reciclado reforzado por fibra de vidrio.**  
**Aplicación estructural en la arquitectura.**

- *Fibra de vidrio E*: es la más utilizada, representa el 90% del refuerzo de los materiales compuestos. También es utilizado en la industria textil. Tiene buenas propiedades dieléctricas, baja humedad, durable y de bajo costo.
- *Fibra de vidrio A*: tiene un alto porcentaje de sílice. Sus propiedades mecánicas son inferiores a los demás tipos y tiene un módulo más bajo que el vidrio E, Se utiliza como reforzante y tiene una gran resistencia química, como a medios alcalinos.
- *Fibra de vidrio B*: es borosilicato de calcio de bajo contenido en álcalis, De gran durabilidad, posee excelentes propiedades eléctricas.
- *Fibra de vidrio S*: tiene muy buenas resistencias mecánicas y, en especial, una alta resistencia a la tracción. Muy estable térmicamente se utiliza, fundamentalmente, en aeronáutica.
- *Fibra de vidrio C*: de altas resistencias químicas. Es un vidrio intermedio entre el A y el E. Se utiliza en las capas superficiales de elementos expuestos a la corrosión o de estructuras anticorrosión.
- *Fibra de vidrio R*: tiene unas altas resistencias mecánicas, siendo su resistencia a la tracción y su módulo de elasticidad muy superiores a los de los otros vidrios. Se emplea, sobre todo, en los campos de la aeronáutica, aviación, armamento y, en general, cuando se exigen materiales muy resistentes a la fatiga, la temperatura y la humedad.
- *Fibra de vidrio tipo D*: tiene unas altas propiedades dieléctricas por lo que su empleo es recomendado en la construcción de materiales electrónicos, de comunicación y como material permeable a las ondas electromagnéticas. Se utiliza en la fabricación de radares y ventanas electromagnéticas.
- *Fibra de vidrio AR*: es la que se utiliza para armar los morteros de cemento (GRC) por ser resistente a los álcalis del cemento (Santiago et al., 2003b)

## 1.7 Características mecánicas

**Esfuerzo.** Los esfuerzos mecánicos o esfuerzos de sección son magnitudes físicas con unidades de fuerza sobre área utilizadas entre otras cosas en el cálculo de piezas prismáticas. Los esfuerzos internos sobre una sección transversal plana de un elemento estructural se definen como un conjunto de fuerzas y momentos estáticamente equivalentes a la distribución de tensiones internas sobre el área de esa sección.

Esfuerzo normal (normal o perpendicular al plano considerado), es el que viene dado por la resultante de tensiones normales  $\sigma$ , es decir, perpendiculares, al área para la cual pretendemos determinar el esfuerzo normal.

Esfuerzo cortante (tangencial al plano considerado), es el que viene dado por la resultante de tensiones cortantes  $\tau$ , es decir, tangenciales, al área para la cual pretendemos determinar el esfuerzo cortante.

Mediante la siguiente ecuación se puede determinar el esfuerzo:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde P, es la fuerza aplicada y A es el área donde se aplica dicho esfuerzo. Los esfuerzos pueden ser aplicados a tensión o a compresión.

**Deformación.** Es el cambio en la forma de un material que resulta de la aplicación de fuerza, y es medida por el cambio en su longitud. La ley de elasticidad de Hooke, sirve para comprender la relación unitaria entre esfuerzo y deformación. El alargamiento unitario que experimenta un cuerpo elástico es directamente proporcional a la fuerza aplicada sobre el mismo. Lo anterior, se expresa a través de la siguiente ecuación:

$$\text{Para conocer la deformación total } \delta = \frac{PL}{AE} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

P= fuerza aplicada

L= longitud original

A= sección transversal de la pieza estirada

E= módulo de Young

$$\text{Para conocer la deformación unitaria } \epsilon = \frac{\delta}{L} = \frac{L-L_f}{L_f} \quad \text{Ecuación 3}$$

$\delta$ = deformación total

L= longitud original

L<sub>f</sub>= longitud final

$$\text{Para conocer el esfuerzo unitario } \sigma = \epsilon E \quad \text{Ecuación 4}$$

$\epsilon$ = deformación unitaria

E= módulo de Young

**Módulo de Young (módulo de elasticidad).** El módulo de elasticidad para un material elástico lineal e isótropo, es la relación de la tensión ejercida sobre el área de la sección transversal del elemento ( $\sigma = P/A$ ) entre la deformación unitaria entendida como la relación entre el cambio de longitud con respecto a la longitud inicial ( $\epsilon = \delta/L$ ).

El módulo de elasticidad para materiales elásticos lineales se define mediante la siguiente ecuación:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

$\sigma$ = deformación unitaria o tensión ejercida sobre el área de la sección transversal del elemento.

$\epsilon$ = deformación unitaria

Mientras para materiales elásticos no lineales cuya curva observada en una gráfica de esfuerzo-deformación no tiene ningún tramo lineal, se debe conocer el módulo de elasticidad secante que se puede entender como el incremento de esfuerzo aplicado a un material y el cambio correspondiente a la deformación unitaria que experimenta en la dirección de aplicación del esfuerzo.

$$E_{sec} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

$\Delta\sigma$ = variación del esfuerzo aplicado

$\Delta\epsilon$ = variación de la deformación unitaria

**Coefficiente de Poisson.** Es una constante aplicada a los materiales con comportamiento elástico lineal e isótropo. Cuando se aplica una carga cuando se estira o comprime longitudinalmente y se adelgaza o ensancha en las direcciones perpendiculares a la de estiramiento.

De un prisma, el coeficiente de Poisson se puede medir como: la razón entre el acortamiento de una longitud situada en un plano perpendicular a la dirección de la carga aplicada, dividido en el alargamiento longitudinal producido. Este valor coincide igualmente con el cociente de deformaciones (García Garduño & Santa Ana Lozada, 2017).

$$\mu = \frac{\epsilon_L}{\epsilon_A} \quad \text{Ecuación 7}$$

$\mu$ = coeficiente de poisson

$\epsilon_L$ =deformación de las caras laterales

$\epsilon_A$  = deformación axial

## 1.8 Análisis térmicos

**TGA análisis termogravimétrico.** Es una técnica que mide la masa de una muestra mientras se calienta, enfría o se mantiene isotérmicamente en una atmósfera definida. Se utiliza principalmente para el análisis cuantitativo de productos. Una curva TGA típica muestra los pasos de pérdida de masa relacionados con la pérdida de componentes volátiles (humedad, solventes y monómeros), descomposición del polímero, combustión de negro de carbón y residuos finales (ceniza y cargas). El método nos permite estudiar la descomposición de productos y materiales y sacar conclusiones sobre sus componentes individuales.

Los resultados de la medición se registran en términos de masa en función de la temperatura o el tiempo. El análisis termogravimétrico (TGA) generalmente se refiere a un tipo específico de instrumento diseñado para realizar mediciones termogravimétricas.

La termogravimetría de polímeros y plásticos está sujeta al método ASTM D3850, el cual, mide la masa mientras aumenta la temperatura. masa – temperatura – tiempo. Otras magnitudes pueden derivarse de estas mediciones de base.

La termogravimetría es un proceso de descomposición, en el cual los enlaces químicos se rompen y los compuestos orgánicos complejos o polímeros se descomponen para formar productos gaseosos como agua, dióxido de carbono o hidrocarburos.

Un analizador termogravimétrico típico consiste en una balanza de precisión con una bandeja de muestra ubicada dentro de un horno con una temperatura de control programable. La temperatura generalmente aumenta a una velocidad constante (o, en algunas aplicaciones, la temperatura se controla para una pérdida de masa constante) para incurrir en una reacción térmica.

El Análisis Termogravimétrico (TGA), mide la masa (pérdida o ganancia) de una muestra cuando ésta se somete a un programa controlado de temperatura.

Por esta técnica pueden determinarse el porcentaje de pérdida de peso por descomposición, por deshidratación, por pérdida de disolvente, por pérdida de plastificante, etc. También puede determinarse la estabilidad térmica u oxidativa, la descarboxilación, la pirolisis o el porcentaje de aditivos.

**DSC calorimetría diferencial de barrido.** La calorimetría diferencial de barrido (en inglés, Differential Scanning Calorimetry o DSC) es una técnica termo analítica en la que la diferencia de calor entre una muestra y una referencia es medida como una función de la temperatura. La muestra y la referencia son mantenidas aproximadamente a la misma temperatura a través de un experimento.

Generalmente, el programa de temperatura para un análisis DSC es diseñado de tal modo que la temperatura del portador de muestra, aumenta linealmente como función del tiempo. La muestra de referencia debería tener una capacidad calorífica bien definida en el intervalo de temperaturas en que vaya a tener lugar el barrido. El principio básico subyacente a esta técnica es que, cuando la muestra experimenta una transformación física tal como una transición de fase, se necesitará que fluya una mayor o menor cantidad de calor a la muestra que a la referencia para mantener ambas a la misma temperatura. El que fluya más o menos calor a la muestra depende de si el proceso es exotérmico o endotérmico.

Por ejemplo, en tanto que una muestra sólida funde a líquida se requerirá que fluya más calor a la muestra para aumentar su temperatura a la misma velocidad que la de referencia. Esto se debe a la absorción de calor de la muestra en tanto ésta experimenta la transición de fase endotérmica desde sólido a líquido. Por el contrario, cuando la muestra experimenta procesos exotérmicos (tales como una cristalización) se requiere menos calor para alcanzar la temperatura de la muestra.

Determinando la diferencia de flujo calorífico entre la muestra y la referencia, los calorímetros DSC son capaces de medir la cantidad de calor absorbido o eliminado durante tales transiciones. La DSC puede ser utilizada también para determinar cambios de fase más sutiles tales como las transiciones vítreas. La DSC es utilizada ampliamente en la Industria como instrumento de control de calidad debido a su aplicabilidad en valorar la pureza de las muestras y para estudiar el curado de los polímeros.

Una técnica alternativa a la DSC es el análisis térmico diferencial (DTA). En esta técnica la magnitud constante no es la temperatura sino el flujo calorífico que se comunica a muestra y referencia. Cuando muestra y referencia son calentadas de modo idéntico, los cambios de fase y otros procesos térmicos producen una diferencia de temperatura entre la muestra y la referencia. Ambas DSC y DTA proporcionan, pues, información similar. No obstante, la DSC es más utilizada que la DTA.

## 2 USO DE PLÁSTICOS RECICLADOS EN LA CONSTRUCCIÓN

La visión historiográfica de los materiales compuestos y en específico de polímeros termoplásticos reforzados por fibra de vidrio, permite conocer la aplicación, campos de oportunidad y potencial para el material propuesto. A través de este estudio se generan conclusiones que permiten conocer como a través del reciclaje y la producción con refuerzo de fibras en algunos casos cortas dispuestas al azar, se han obtenido productos con aplicación en la construcción. Entre los casos a destacar se encuentra el polipropileno y el polietileno de alta densidad.

### 2.1 Residuos plásticos

Los contaminantes generados por los residuos sólidos urbanos (RSU), son un problema mundial al ser depositados en ecosistemas como el marino, donde se pueden mantener por miles de millones de años, siendo transportados por las corrientes marítimas debido a su densidad y durabilidad (Wang, J. et al., 2016). La falta de visión para el uso de productos plásticos que encuentran de manera rápida el fin de su posible vida útil, como es el caso de productos para embalaje, produce residuos sólidos urbanos y por lo tanto contaminantes. La producción de plásticos en México continúa en aumento, así como los residuos que genera, lo cual forma un campo de aprovechamiento para la aplicación en la arquitectura a través del reciclaje.

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

En México según cifras de la SEMARNAT en este año, se generaron un aproximado de 120 mil 128 Toneladas en residuos sólidos urbanos (RSU) al día con 0.994 Kg por persona al día, mientras que en el 2012 los datos fueron de 0.852 Kg por persona al día. Entre las situaciones por las cuales aumenta la cantidad de RSU se encuentra el crecimiento urbano, desarrollo industrial, modificaciones tecnológicas y el cambio en los patrones de consumo.

Predominan los residuos orgánicos ante los inorgánicos, asociado a la condición económica de la población: en los países con menores ingresos dominan los de composición orgánica, mientras que en los países con mayores ingresos los residuos son principalmente inorgánicos, con una cantidad importante de productos manufacturados (Acurio et al., 2014). En México la situación cambia, se reduce la generación de residuos orgánicos y aumentan los inorgánicos: en la década de los años 50, el porcentaje de estos residuos oscilaba entre 65% y 70% de su volumen, mientras que en 2017

esta cifra se redujo a 51.6% (Presidencia de la República, 2017)

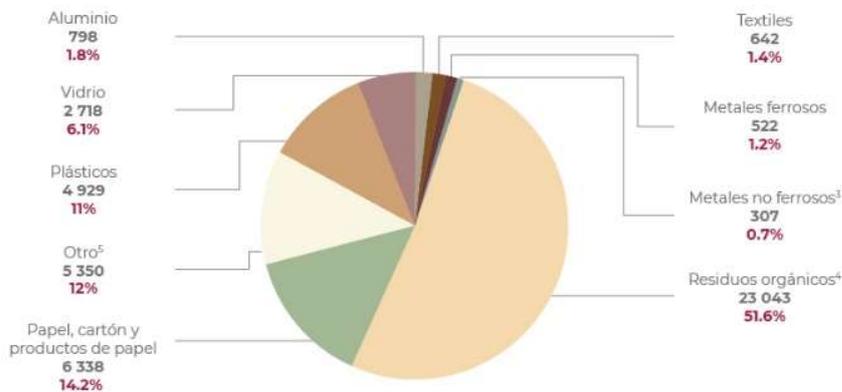


Figura 7. Porcentaje de residuos sólidos urbanos generados.

**Notas:**

- <sup>1</sup> La cantidad de residuos se presenta en miles de toneladas.
- <sup>2</sup> Los datos para este año son estimados.
- <sup>3</sup> Incluye cobre, plomo, estaño y níquel.
- <sup>4</sup> Incluye residuos de comida, de jardines y materiales orgánicos similares.
- <sup>5</sup> Incluye residuos finos y pañales desechables, entre otros.

**Fuente:**

Presidencia de la República. *5to. Informe de Gobierno*. Presidencia de la República. México. 2017.

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% (ANIPAC, 2021). Al tomar en cuenta la cantidad de residuos plásticos del polietileno de alta densidad, se puede contar con una amplia fuente de materia prima.

La recolección y separación es un paso hacia continuar la vida útil de los residuos. La jerarquía para la gestión de residuos propuesta en 1975 por la Directiva Marco de Residuos de la Unión Europea (1975/442/CEE), toma en cuenta las siguientes acciones por orden: prevención, minimización, reutilización, reciclaje, recuperación energética y residuo en vertedero. Si tomamos en cuenta que los residuos plásticos tienen capacidad de reciclaje sin perder significativamente sus propiedades mecánicas tras el primer reciclaje (Goodship, 2007) podemos entender que este es el uso más apropiado al no haber sido re utilizados y encontrarse dentro de los residuos. A demás su transformación en un material más durable, con la posibilidad de re-uso, los convierte en una opción de materia prima.

En México se recicla un 9.6% de los residuos sólidos urbanos, contra un 24% en promedio de la OCDE, y 58% como máximo (OCDE 2016), perdiendo materia prima abundante que tienen como destino en la mayoría de los

casos rellenos sanitarios, los cuales son un problema para la contaminación de sub suelos (Hoorweg & Bhada-Tata, 2012) y en peores casos se depositan directamente en ecosistemas.

Debido a las propiedades de los plásticos, cuentan con características versátiles que los hacen importantes en la vida cotidiana, su producción ha aumentado, así como el problema de su corta vida por ser desechables rápidamente en muchos casos como el embalaje. A esto, se suma la utilización de otros insumos para la extracción y producción (Colomer, F.J & Gallardo, A, 2007).

Una gran parte del plástico producido se utiliza para fines desechables, embalaje u otros productos de corta duración que se descartan en un año, al concluir su uso se depositan en vertederos y también se acumulan en hábitats a lo largo del mundo (Hopewell et al., 2009), lo genera contaminación biótica, química del agua, suelo por contaminantes depositados y micro degradación, lo cual en general contamina el medio ambiente (aire, agua y suelo)(Colomer, F.J & Gallardo, A, 2007).



Figura 8. Desechos plásticos que podrían convertirse en residuos.

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. Esto, través del reciclaje del polietileno de alta densidad, el cual tiene propiedades aptas para la construcción además de ser abundante.

El desconocimiento de un sistema constructivo que emplee plásticos 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. (R. Lampo et al., 2018) No se ha utilizado este polímero como matriz de un material compuesto dentro de un sistema estructural aplicado a la arquitectura.

En México es nula la participación de del PEAD para formar parte de un sistema estructural en la construcción, no existe una reglamentación ni principios que muestren su uso. Este termoplástico debido a sus propiedades y capacidad de re-uso, sumado a las lecciones aprendidas en estructuras para puentes en los EUA, pueden formar parte de las estructuras para construcciones arquitectónicas, con la facilidad de utilizar herramientas convencionales para madera y la ligereza del material

Existen empresas que producen materia prima de PEAD reciclado para diversos productos como Plastimadera, Panel Exológico Tlaxcala, Perfiles Plásticos (en Morelia) o en EE. UU., American Plastic Lumber o Plástic Lumber Yard. A través de lo anterior se puede constatar que existe la aplicación del PEAD reciclado, pero no es perfiles estructurales aplicados a la arquitectura en México, como tal. Lo anterior es una oportunidad para comprobar las propiedades y resultados de un material compuesto con matriz de PEAD reciclado y refuerzo con fibra de vidrio.

Actualmente el desarrollo arquitectónico y en sí el ramo de la construcción en general debe incentivar 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 se 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.

Tomar en cuenta la frase conocida sobre la sostenibilidad "... para satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las

generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades", y hacerlo de manera que equilibre el objetivo del desarrollo económico con la completa consideración del medio ambiente protección, progreso social y derechos individuales.

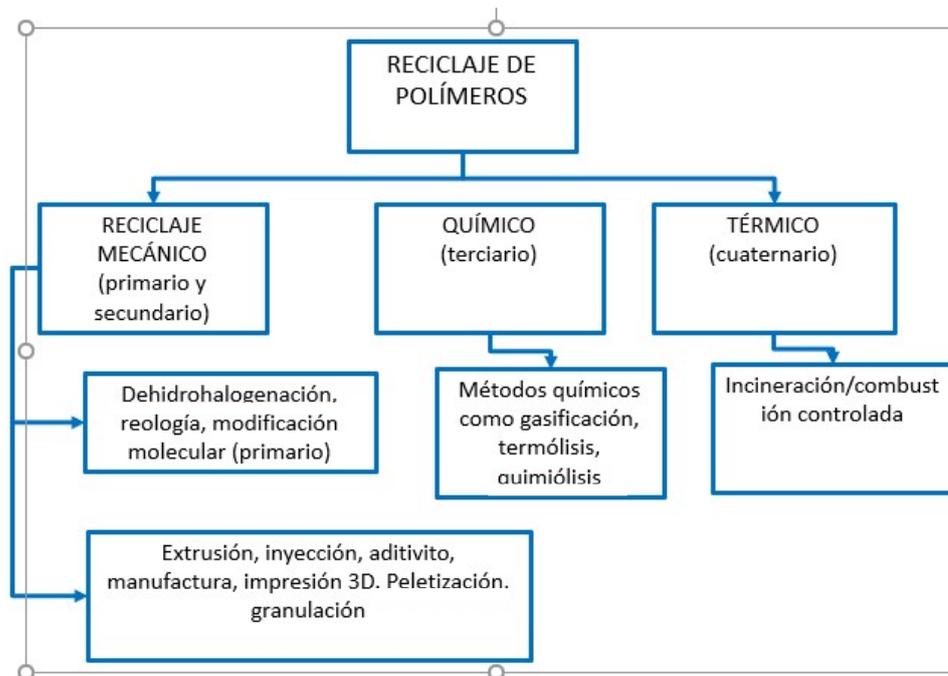


Figura 9. Diagrama de reciclaje de polímeros

La tecnología plástica abarca diversos campos de aplicación, como la medicina, aeronáutica, electrodomésticos, construcción entre otras. Los plásticos son sumamente versátiles, la razón de su éxito radica en la sustitución de materiales tradicionales como la madera, metales y vidrio, en una diversa gama de aplicaciones. Otra parte de su éxito es la capacidad de modificar sus propiedades para satisfacer una amplia gama de necesidades de los diseñadores, los cuales eligen el tipo de plástico, así como su refuerzo en los casos de formar materiales compuestos, para obtener materiales ligeros y a su vez resistentes. Esto, más la facilidad con la que los plásticos pueden ser procesados, los convierte en materiales ideales para la producción de una variedad de componentes.

Los plásticos utilizados para una gran variedad, sobre todo los llamados en estado virgen, los cuales son los que han venido directamente del fabricante del polímero a donde se procesarán por primera ocasión.

Cuando estos materiales vuelven a ser procesados, se les denomina reciclados. Sin embargo, no todos los materiales plásticos vuelven a ser

procesados, algunos se desechan. Un aumento continuo en el uso de los plásticos ha llevado a que estos terminen su ciclo de vida como residuos (Goodship, 2007)

La gestión de los residuos proporciona soluciones al problema de los residuos en el cual se encuentran las sociedades actuales, este problema no es exclusivo de los plásticos. Una combinación de medidas legislativas e iniciativas gubernamentales, el aumento costo de eliminación en vertederos e interés público en apoyo del reciclaje ha significado que el reciclaje de plásticos debe aumentar.

Las estrategias para la gestión de residuos se basan en tres directrices, que en algunos casos se subdividen en más:

- *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, el material recuperado de la corriente de residuos se denomina "recuperación"(Goodship, 2007). Los materiales se denominan recuperables cuando tanto una tecnología de tratamiento como un mercado para el nuevo material resultante están disponibles. La tecnología del reciclaje se ha perfeccionado desde la década de 1980. Hay varias opciones para la recuperación de los materiales que se podrían considerar residuos como: reutilización, mecánica reciclaje, reciclaje de materias primas y valorización energética.

A continuación, se desarrollan los puntos esenciales sobre la recuperación de residuos, para continuar con su ciclo de vida útil.

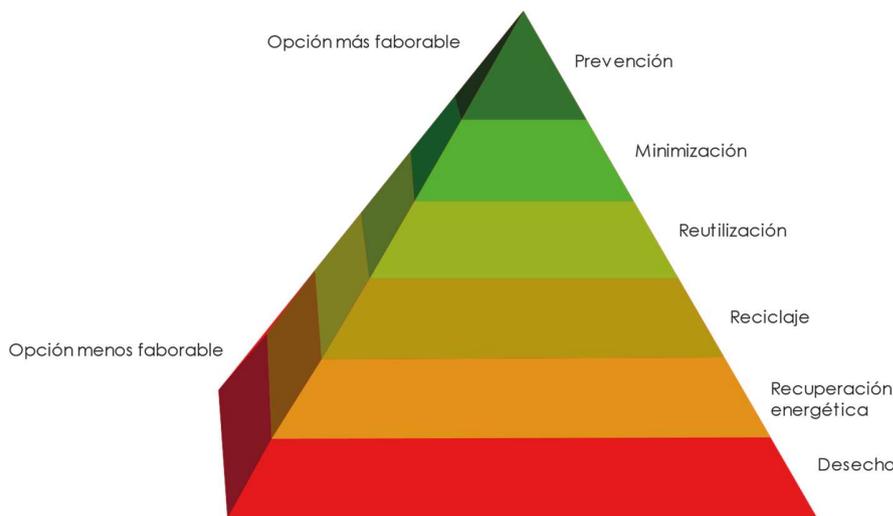


Figura 10. Jerarquía para la gestión de residuos. Criterios para aprovechar los residuos con la menor contaminación y reducción del impacto ambiental.

**Nota:**

Jerarquía de residuos aplicada para la gestión de los desechos de polímeros derivados del petróleo.

**Fuente:**

[https://es.wikipedia.org/wiki/Jerarqu%C3%ADa\\_de\\_residuos](https://es.wikipedia.org/wiki/Jerarqu%C3%ADa_de_residuos).

**Reducir:** el plástico puede encontrar una virtud o un problema en su cualidad para no ser biodegradable.

Algunas acciones como sociedad pueden ayudar al consumo y uso de materiales, de una forma responsable y a mantener los plásticos lo más posible fuera de la corriente de residuos. Uno de ellos es desalentar el uso de plásticos para un solo uso.

También es posible diseñar objetos o soluciones que empleen objetos que puedan ser reutilizables.

Otras acciones son el minimizar o anular la compra de agua embotellada, cubiertos de plástico, re-uso de objeto y extensión de su ciclo de vida, así como a apoyar legislaciones y leyes que imponen impuestos a

prohibición de plásticos de un solo uso

**Reutilización:** los ejemplos más comunes de reutilización son con vidrio recipientes, donde se devuelven las botellas de leche y bebidas para su limpieza y uso de nuevo. La reutilización no se practica ampliamente en relación con el plástico, por ejemplo, con el embalaje en el cual los productos de plástico en general tienden a desecharse después primer uso. Sin embargo, hay ejemplos de reutilización en el mercado. Por ejemplo, varios fabricantes de detergentes comercializan bolsas para detergentes y

suavizantes embotellados. Consumidores pueden rellenar y reutilizar sus botellas de plástico en casa.

**Reciclaje mecánico:** también conocido como reciclaje físico. El plástico se muele y luego se reprocesa para producir un nuevo componente que puede o no ser el mismo que su uso original.

**Reciclaje de materia prima:** el polímero se convierte de nuevo en su aceite / componente de hidrocarburo para su uso como materia prima para un nuevo polímero de producción. Esto también se conoce como reciclaje químico.

**Recuperación de energía:** los materiales se incineran para recuperar su energía inherente.

El reciclaje mecánico es el más practicado de estos. Sin embargo, las otras son opciones valiosas para la eliminación de desechos, especialmente para materiales que no cumplen los criterios de reciclaje mecánico, por razones de practicidad o rentabilidad. Hay varias tecnologías disponibles para la recuperación y el reciclaje plástico. Algunos están actualmente en uso por la industria y son capaces de procesar grandes cantidades de material de forma rentable, mientras que otros existen actualmente solo en laboratorios. Reciclaje de plástico es un área en constante desarrollo para tratar de cumplir con las demandas competitivas de la legislación, las fuerzas del mercado y el medio ambiente presión.

Es importante que el reciclaje sea rentable y deje réditos para que se produzca, por tal motivo se han desarrollado las diversas tecnologías de reciclaje y uso de materiales que podrían convertirse en residuos, para aprovechar una materia prima que actualmente es abundante. También resulta necesario que los materiales reciclados puedan competir y hasta reemplazar a los materiales vírgenes. Dependerá tanto del precio de los materiales vírgenes como de la calidad del reciclado. El precio de los de estos materiales puede variar mucho, ya que se encuentran vinculados tanto a los precios del petróleo como a la oferta y la demanda en el mercado.



Figura 11. Reciclaje de desechos plásticos.

**Nota:**

El reciclaje de los plásticos debe ser rentable, al funcionar como negocio, para que su expansión continúe, así como los beneficios medio ambientales que produce el reducir los residuos.

**Fuente:** <https://shutterstock.com/banco-de-imagen/sin-copyright>

La presión generada debido a la emergencia ambiental en la cual nos encontramos inmersos genera la necesidad de proveer soluciones que aminoren el daño ambiental. Al crear tal mercado, un fabricante puede ver una ganancia por obtener y, por lo tanto, comenzará a producir y vender bienes reciclados. Este negocio también estará sujeto a los efectos de fuerzas del mercado, oferta y demanda. La presión ambiental también puede resultar en una legislación que obligue a los fabricantes a utilizar materiales reciclados.

En este caso, es posible que no exista un mercado y esta legislación tendrá un impacto en la fuerza del mercado "natural". El resultado puede ser menor rentabilizar y requerir subvenciones para poner en marcha dicha actividad. A largo plazo, sin embargo, la actividad debe ser autosuficiente (Goodship, 2007).

Una infraestructura totalmente sostenible para el reciclaje y la recuperación, de plásticos es necesario si las grandes cantidades de material plástico disponibles se van a desviar de los vertederos. Sin embargo, esto ocurrirá solo cuando la demanda se crea para los materiales del producto final y es

44/176

**Poliétileno de alta densidad reciclado reforzado por fibra de vidrio.**

**Aplicación estructural en la arquitectura.**

económicamente viable reciclarlos. Actualmente, esto tiene significado que las actividades de reciclaje deben ser subsidiadas si no son comercialmente rentable. Por lo tanto, es primordial que el plástico la industria continúa educando al público y recicla el potencial usuarios con el fin de crear y desarrollar la oferta y la demanda de estos materiales.

Antes de que los métodos de reciclaje se discutan con más profundidad, una familiaridad con algunos de los fundamentos de la ciencia de los polímeros.

### **Aplicación de termoplásticos reciclados en la construcción**

Los materiales poliméricos termoplásticos son viscoelásticos en términos de sus propiedades mecánicas. Esto significa que las propiedades mecánicas dependen del tiempo y la temperatura, están sujetos a deformación permanente (fluencia) bajo cargas sostenidas. La tasa de fluencia depende de la magnitud, temperatura y duración de las cargas aplicadas (*Recycled Plastic Lumber Feature*, s. f.). Lo anterior, es una razón más para continuar con el estudio de un material que representa un beneficio medio ambiental y a la construcción, debido a sus propiedades y aplicaciones.

Algunos de los primeros diseños de productos funcionaron bien inicialmente, pero luego se curvaron debido a la deformación. El uso de plásticos reciclados como plataforma sobre un sustrato de madera tratada también ganó popularidad, lo cual es llamado madera plástica. Debido, a la menor rigidez de las tablas de la plataforma y su propensión a deslizarse por su propio peso, si el claro era demasiado grande, se redujeron los espacios entre las viguetas y / o se usaron tablas de plataforma más gruesas (en comparación con las que se usaron si la plataforma estaba hecha de madera natural). A medida que la industria de la madera plástica luchaba por abrirse camino, el uso de plásticos reciclados en estructuras al aire libre como cubiertas, pasarelas y muelles se consideró una gran oportunidad. Las mesas de jardín y los bancos del parque de RPL se consideran valiosos, pero la demanda no es lo suficientemente grande como para desviar cantidades significativas de residuos plásticos de los

Inicialmente, los fabricantes de madera plástica reciclada especificaron métodos de prueba existentes desarrollados para resinas plásticas vírgenes para medir propiedades tales como resistencia y módulo a la compresión y resistencia y módulo a la flexión. Sin embargo, los investigadores de materiales rápidamente se dieron cuenta de que había una deficiencia en el uso de estos métodos de prueba existentes para plásticos reciclados.

Estos métodos se toman de muestras extruidas o cortadas del material producida. Lo anterior, funciona bien para materiales homogéneos de

sección delgada, como láminas o varillas de plástico. Sin embargo, los materiales poliméricos reciclados tienen secciones transversales gruesas que no son homogéneas. Los RPL hechos de plásticos mezclados pueden contener inclusiones e impurezas de material. Incluso si está hecho de polímero 100% virgen, la termodinámica del procesamiento conduce a una sección transversal no homogénea con un gradiente de densidad que es más alto en las superficies exteriores y más bajo en el centro.

Como hemos visto, existen productos comercializados que pretenden la sustitución de la madera o la inclusión de los materiales plásticos como parte de la construcción de estructuras peatonales, a través de andadores y pisos. Sin embargo, el potencial de dichos productos que han demostrado su importancia tiene un mayor potencial que puede ser aplicado dentro de la arquitectura.

El problema se presenta en la aplicación de métodos de prueba que sean compatibles con el material compuesto de matriz termoplástica reciclada y la compatibilidad con fibras de refuerzo; la determinación de modelos matemáticos fundamentados en la mecánica de materiales para el pronóstico de las propiedades así como el diseño de los procesos de producción y componentes del material, para lograr proponer su aplicación basada en las propiedades mecánicas y físicas; y la aplicación para cubiertas de gran claro para entornos arquitectónicos a través de la visualización que proporciona la representación gráfica en conjunto a la aplicación de códigos y reglamentos de diseño estructural y construcción que sean aplicables al material de estudio.

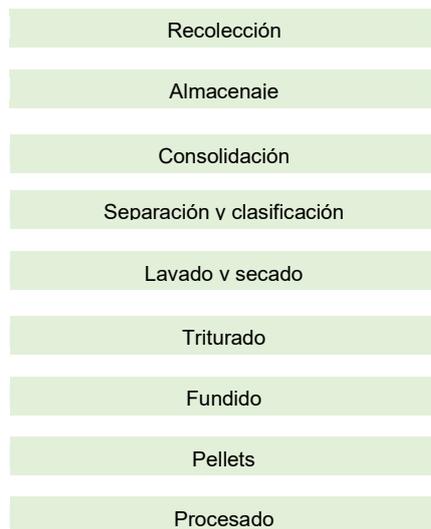


Figura 12. Esquema para el proceso de reciclaje en los termoplásticos.

**Nota:**  
Elaboración propia.

La densidad de los plásticos aunado a su capacidad mecánica los hace materiales que pueden ser aplicados en la construcción en diversas áreas, una de ellas es como estructura. Se cuenta con factores que disminuyen su capacidad de carga, que deben ser estudiados. Las propiedades del polietileno de alta densidad lo hacen un material que se puede utilizar en estructuras ligeras de gran claro para cubiertas.

Al conocer las propiedades de este material reforzado por fibra de vidrio, se puede realizar un proyecto integrado a la arquitectura donde se muestre su campo de aplicación. Ya que este plástico es uno de los más producidos y consumidos en el mundo, lo hace una fuente de materia prima para producir perfiles que puedan reciclarse o reutilizarse.

## 2.2 Historia de los materiales compuestos con matriz termoplástica

Los primeros materiales compuestos se remontan a la edad antigua, aproximadamente al año 1500 aC con los egipcios y los mesopotámicos los cuales, utilizaron barro y paja para la construcción. Más tarde, en 1200, los mongoles inventaron el primer arco compuesto. Usando una combinación de madera, hueso, y cola animal, arcos se prensaron y se envuelven con la corteza de abedul. Estos arcos fueron potente y preciso, lo cual fue fundamental para el desarrollo militar.

La era moderna de materiales compuestos comenzó cuando los se desarrollaron plásticos. Hasta entonces, resinas naturales derivados de plantas y animales eran la única fuente de pegamentos y aglutinantes. A principios de 1900, se desarrollaron los plásticos tales como vinilo, poliestireno, fenólicas, y de poliéster. Estos nuevos materiales sintéticos superaron resinas individuales derivados de la naturaleza.

Sin embargo, los plásticos solos no podían proporcionar la fuerza suficiente para algunas aplicaciones estructurales, por lo que fue necesario un refuerzo que proporcione resistencia y rigidez adicional.

En 1935, Owens Corning presentó la primera fibra de vidrio, fibra de vidrio. Fibra de vidrio, cuando se combina con un polímero plástico crean una estructura increíblemente fuerte, que también es de peso ligero. Este es el comienzo de la industria de polímeros reforzados con fibras (FRP *fiber reinforced polymer*).

En la década de 1970 los composites industria comenzó a madurar. Se han desarrollado mejores resinas plásticas y la mejora de fibras de refuerzo. DuPont desarrolló una fibra de aramida conocido como Kevlar, que se ha convertido en el producto de elección en la armadura de cuerpo debido a

su fuerza de alta resistencia, alta densidad, y de peso ligero. La fibra de carbono también se desarrolló en esta época; Cada vez más, se ha reemplazado partes antes de acero (Greelane, 2018).

Los polímeros han exhibido una durabilidad superior a los materiales de construcción convencionales en entornos agresivos. (Bozorg-Haddad et al., 2012). Los polímeros de PEAD reciclado pueden ser utilizados en la construcción con algunas precauciones. Primero se encontró que la resistencia a la compresión, flexión y tracción dependía en temperatura, y disminuyen durante el verano. En segundo lugar, se encontró que la adición de fibra de madera generalmente mejora las propiedades mecánicas de los miembros (Spalding & Chatterjee, 2017).

Finalmente es conveniente hacer mención respecto a que las propiedades del PEAD reciclado variaron según los fabricantes.

Los compuestos resultantes a través de los estudios para el reciclaje del PEAD, han sido polímeros inmiscibles, en las que la unión mecánica entre las fases permitió una eficiente relación entre la resistencia a la tensión y a la compresión. Se ha utilizado como base el PEAD, con otros polímeros más rígidos e incluso reforzados, como es el caso de poliestireno/PEAD o el polipropileno/PEAD. Los anteriores, son materiales estructurales capaces de soportar cargas, se denominan madera compuesta termoplástica reforzada (RTCL por sus siglas en inglés recycled thermoplastic composite lumber).

### 2.3 Surgimiento y evolución del polietileno de alta densidad

El uso de los polímeros se remonta al siglo XVI a. C., cuando culturas antiguas mesoamericanas procesaron por primera vez el caucho natural en objetos sólidos como bolas, figurillas humanas, bandas para atar cabezas de hacha a los agarradores de madera y otros objetos. Los antiguos mesoamericanos obtenían la materia prima para fabricar objetos de caucho de látex producido por el árbol Castilla elástica. Esta especie es nativa de las tierras bajas tropicales de México y América Central. El látex es un líquido blanco pegajoso que cuando se seca es un sólido frágil que retiene su forma. Cronistas españoles relataron que los indígenas mesoamericanos procesaban el látex de C. elástica mezclando con jugos de otra especie, Ipomea alba, logrando la coagulación de la resina. Así, estos descubrimientos preceden por 3500 años al proceso de vulcanización (Hosler et al., 1999).

En 1839, Goodyear en los Estados Unidos, y Hancock en Inglaterra; desarrollaron paralelamente la vulcanización del caucho, es decir el endurecimiento del caucho y su mayor resistencia al frío. Así se inició el éxito comercial de los polímeros termoestables.

La industria del plástico se inicia con el desarrollo de los primeros plásticos termoestables por Baekeland en 1909. Baekeland produce el primer polímero sintético y además desarrolla el proceso de moldeado del plástico que le permitió producir diversos artículos de comercio. Estos primeros plásticos se denominaron baquelita en honor a su descubridor. La baquelita se forma por una reacción de condensación de fenol con formaldehído.

Entre los años 1926 y 1928 surgieron los termoplásticos alquídicos y resinas aminas, respectivamente. Los alquídicos son poliésteres modificados por la adición de ácidos grasos y otros componentes, son derivados de polioles y ácidos dicarboxílicos o ácidos carboxílicos anhidros. Entre las resinas aminas está la urea-formaldehído, también conocida como urea-metanal, es una resina termoplástica sintética no transparente y con aplicaciones en adhesivos (Goodman & Dodiuk, 2014).

La primera síntesis conocida, del polietileno fue realizada por Hans Von Pechmann en 1898, mientras realizaba un experimento que involucró en calentamiento del diazometano. Durante el proceso observó la descomposición de una sustancia cerosa blanca. Un análisis posterior de sus colegas Eugene Bamberger y Friedrich Tschirner evidenció la composición de Hidrógeno y Carbono con repetidas unidades de CH<sub>2</sub>, llamando a este nuevo material polimetileno (Spalding & Chatterjee, 2017).

La primera síntesis significativa del polietileno fue gestionada por Eric W. Fawcett y Reginald O. Gibson en **1933** en Norwich Inglaterra. En este experimento se aplicó presión de entre 1700 a 2000 Atm a 170 °C.

En 1936 Michael Perrin y sus colegas retomaron los experimentos y lograron producir varios gramos de polietileno, en un laboratorio con mayor tamaño y equipamiento. En 1937 obtuvieron una patente descrita como polimerización del etileno de alto peso molecular iniciada por oxígeno.

Rápidamente se convirtió en un material ampliamente utilizado para submarinos, cables telefónicos y de telégrafos. Gozaba de una gran similitud con una especie de caucho de látex natural, que era utilizado como aislante de cables en esos momentos. Posteriormente se mostró que el polietileno era un material resistente, elástico, dieléctrico, con factor de pérdida bajo y constante y una excepcional resistencia a la humedad. *La primera planta de polietileno inició labores el 2 de septiembre de 1939* (Spalding & Chatterjee, 2017).

## 2.4 Inicios en reciclaje de plásticos

En **1970** surge el primer registro de madera plástica en Europa y Japón, como una manera de utilizar la chatarra de **plástico postindustrial**, que era la

fuentes de plástico de bajo costo disponibles.

Los compuestos de polímeros reciclados han encontrado aplicaciones en estructuras compuestas como puentes cortos, alfombras de construcción, traviesas de ferrocarril (también llamados durmientes), etc. El uso de compuestos poliméricos reciclados (Lotfy et al., 2016).

A finales de **1980 expertos en reciclaje de plástico** consideraron los procesos de madera plástica como una alternativa al uso de residuos plásticos en lugar de enviarlos a vertederos. La economía y la logística para la reducción de residuos impulsaron esta industria. (R. G. Lampo & Nosker, 1997)

**Primer proceso de reciclaje de resina:** en la década de los 1980, el primer proceso de recuperación de resina se desarrolló en la Universidad de Rutgers, y 26 licencias no exclusivas se vendieron en todo el mundo. Esta planta piloto de 1000 lb / hora para producir las escamas limpias de PEAD requirieron un tiempo de lavado de 10 minutos en una solución de lavado a 82 ° C, concentración de detergente líquido inferior al 5% y una potencia de agitación de aproximadamente 0,058 kW / L.

Para el reciclaje de circuito cerrado de películas de polietileno de baja densidad, este proceso se consideró inviable debido a contaminación. Sin embargo, este proceso ha sido viable para proporcionar escamas limpias de PEAD para reciclaje de circuito abierto en aplicaciones que incluyen contenedores de botellas y tuberías. Las pequeñas plantas de recuperación de resina de PEAD procesan típicamente alrededor de 1000 kg / h.

La adopción de un código de identificación por parte de los fabricantes de productos plásticos y envases ha mejorado enormemente la recuperación, caracterización y clasificación de la variedad de plásticos en el flujo de residuos. Seis códigos de polímeros identificados numéricamente como: 1-polietilentereftalato (PET), 2-polietileno de alta densidad (PEAD), 3-cloruro de polivinilo (PVC), 4-polietileno de baja densidad (PEBD), 5-polipropileno (PP) y El 6-poliestireno (PS) constituye la mayoría de los plásticos posconsumo. Otros tipos de plásticos se incluyen en el Tipo 7.

## 2.5 Normatividad para el uso de plásticos reciclados como madera plástica

Las resinas posconsumo (PCR) se pueden utilizar como sustituto de las materias primas en productos elaborados tradicionalmente a partir de otros materiales, como madera, metales y concreto. Un excelente ejemplo de esta aplicación es la madera de plástico reciclado (RPL). La fabricación de RPL a partir de resinas posconsumo y postindustrial es prometedora, ya que consume grandes cantidades de residuos plásticos que de otro modo se

destinarían a los vertederos y convierte los residuos en productos útiles y duraderos (Recycled Plastic Lumber Feature, s. f.). El problema es la falta de estándares, lo cual es una barrera particular para el uso de RPL por parte de la industria de la construcción, especialmente para aplicaciones estructurales.

A principios de la década de 1990, antes del desarrollo de cualquier estándar para RPL, empresarios crearon la industria de la madera plástica en los Estados Unidos importando tecnología de Europa, para el moldeo de termoplásticos.

Existen aproximadamente de 25 a 30 fabricantes de RPL y productos relacionados en América del Norte. El control de calidad se realiza principalmente mediante verificación visual y, a veces, mediante ediciones de densidad. No se miden otras propiedades en el producto terminado ni se conservan muestras de cada lote para los registros. Aunque las deficiencias de procesamiento, la inconsistencia del producto, la disponibilidad de PCR y la volatilidad de los precios y la falta de penetración en el mercado han contribuido al uso limitado de RPL en la construcción, el factor más importante es la ausencia de estándares y especificaciones (Recycled Plastic Lumber Feature, s. f.)

## 2.6 Uso de los termoplásticos en la construcción global

**En el año 1990 surge la madera plástica en EE UU** *RPL recycled plastic lumber* (madera plástica reciclada) es un sustituto atractivo para madera natural porque es inherentemente resistente a la humedad, la putrefacción y los insectos dañar. No requiere tratamientos químicos venenosos. La fabricación de este material reciclado desvía los residuos plásticos de los vertederos, su uso reduce la deforestación y tiene un impacto ambiental ventajoso. Estos productos RPL originales tienen similares valores de resistencia a madera de tamaño equivalente. Sin embargo, el módulo elástico de rigidez es al menos un orden de magnitud menor que incluso las especies de madera más comunes utilizadas en la construcción.

**A mediados de los años 90**, la universidad de Rutgers, desarrollo una traviesa de ferrocarril que utiliza polietileno de alta densidad reciclado. Se encontraron con la primera estructura civil hecha en su totalidad de madera plástica de gran importancia fue el **muelle Tiffany Street** en Bronx Nueva York. Se trata de un muelle para recreación de 125 m largo por 15 m ancho. (R. Lampo et al., 2018)



Figura 13. Mirador Tiffany Street NY, EE UU

**Nota:**

Mirador hecho base de madera plástica, producto en sustitución de la madera para construir estructuras ligeras de bajo peso, hecho a partir de termoplásticos reciclados

**Fuente:** Imagen tomada de R. Lampo, T. Nosker, G. Nagle, S. Nemeth, K. Palutke, y L. Clark, "Demonstration of thermoplastic composite I-beam design bridge at Camp Mackall, NC."

El muelle, ubicado al final de Tiffany Street en el Bronx en la ciudad de Nueva York. Este muelle de recreación de aproximadamente 410 pies (125 m) de largo por 49 pies (15 m) de ancho fue diseñado por el Departamento de Servicios Generales de la Ciudad de Nueva York. La estructura utilizó plástico reciclado para pilotes, vigas de madera, terrazas y barandas.

El primer puente vehicular realizado con una mezcla de polímero inmiscible de poliestireno como matriz reforzada con polietileno de alta densidad con sección transversal rectangular se construyó en **Fort Leonard Wood, Missouri en 1998**, con un alto costo inicial en comparación con los materiales tradicionales. Dicha estructura utilizó vigas de acero como estructura principal para soportar secciones termoplásticas que no han requerido mantenimiento y mantienen un aspecto nuevo.

En cuanto al costo, este resultó ser favorecedor tras ocho años debido a su ciclo de vida y bajo mantenimiento que requirió sólo el cambio de ocho tablas de polímero. McLaren Engineering Group realizó el diseño de la estructura del puente con base a las normas ASTM de madera plástica. Se utilizaron la estructura termoplástica como vigas de soporte sobre las vigas de acero. Las herramientas utilizadas fueron las mismas que las utilizadas para trabajar la madera.

Los materiales compuestos que pueden conformar la madera plástica se expanden y contraen con cambios de temperatura en mayor medida que el acero o la madera, por lo tanto, se pensó en esta característica para diseñar la estructura en relación a las conexiones entre las vigas termoplásticas y la estructura de acero, como fue el caso de conexiones ranuradas.

Una estructura de madera tendría que ser remplazada cada 15 años y tener inspecciones así como mantenimiento dos veces al año. Se espera que este puente tenga una vida útil en más de 50 años.

Es importante mencionar que se utilizaron 5896.70 Kg de desechos plásticos que de otra forma hubieran tenido su destino en vertederos (Chandra et al., s. f.).



Figura 14. Puente de termoplásticos Leonard Wood, Missouri.

**Nota:**

Los termoplásticos han sido utilizados en puentes, para tránsito vehicular y peatonal.

**Fuente:** R. Lampo, T. Nosker, G. Nagle, S. Nemeth, K. Palutke, y L. Clark, "Demonstration of thermoplastic composite I-beam design bridge at Camp Mackall, NC."

**En Albany Nueva York**, se realizó un puente con estructura en forma de arco utilizando vigas laminadas de entre 6x2" y 8x2", lo cual resulta en una mayor eficiencia en el uso del material. Este puente fue hecho para comprobar si es posible que los plásticos reciclados puedan formar parte de una estructura en forma de arco y vigas laminadas. No se utilizó maquinaria pesada ni herramientas de construcción especializada.



Figura 15. Puente en forma de arco, construido por McLaren Consulting Engineers, en NY

**Nota:**

El puente fue realizado con piezas termoplásticas y de acero en las uniones, así como, tensores.

**Fuente:**

Demonstration of Thermoplastic Composite I-Beam Design Bridge at Camp Mackall, NC : Final Report on Projects FY08-16 and FY09-31

**En 2003**, se construyó otro puente de madera totalmente de plástico utilizando miembros estructurales de madera de plástico con vigas en I. Este puente, **ubicado en Wharton State Forest, Nueva Jersey**, fue diseñado para una clasificación de Clase H-20 (20 toneladas [18,1 Mg]), ya que debe poder soportar un camión de bomberos que podría ser necesario para responder una llamada dentro de esta parte del bosque. El diseño de vigas en I redujo el tiempo de construcción y los materiales necesarios para construir una estructura de puente con la misma capacidad de carga en comparación con la construcción convencional de vigas.

El diseño y la construcción fueron un esfuerzo de colaboración entre el personal de McLaren Engineering Group, Nueva York, y la Universidad de Rutgers, Nueva Jersey. Los costos de este puente no se analizaron y documentaron completamente, este diseño de vigas en I parece ser competitivo en base al primer costo con la madera tratada convencional con consideraciones de ciclo de vida debido al material reducido usado debido al diseño la mano de obra reducida requerida para completar el puente debido a los prefabricados ERDC / CERL TR-17-45 12. Estos dos ahorros se combinan para hacer que el nuevo diseño sea aún más ventajoso para los propietarios del puente (Wallenberger & Bingham, 2010).



Figura 16. Vigas en forma de I, en Wharton State Forest, Nueva Jersey.

**Nota:**

Se utilizaron herramientas convencionales, sin necesidad de maquinaria pesada para la construcción.

**Fuente:**

Imagen tomada de R. Lampo, T. Nosker, G. Nagle, S. Nemeth, K. Palutke, y L. Clark, Demonstraton of polimeric bridge

**En el 2008 en Camp Marshall Carolina del Norte** hubo otra oportunidad más para demostrar las capacidades de las estructuras a base de polímeros termoplásticos. Se realizó como parte de los programas CPC e ITTP los cuales son programas del ejército de los EUA, centrados en la validación de tecnología y procesos emergentes que muestran ahorros de costos potenciales para el ejército y el resto del departamento de defensa mediante el uso de materiales y procesos más duraderos y rentables. Este puente pudo soportar una carga de 4.7 Toneladas. Para el 2011 se agregaron tres nuevos puentes con base en este diseño: T-8519, T-8518, T-8520.

**En el 2011 se construyó el puente Birch Hill Road en York, Maine**, el cual es el primer puente termoplástico construido en el sistema de carreteras de EUA, en diciembre del 2011. Es un material idóneo para la zona, ya que esta cuenta con inundaciones continuas. Mide 7.9 m de largo por 4.3 m de ancho. Todos los componentes de este puente están realizados con materiales plásticos reciclados. Se eligió este material por su apariencia de madera, durabilidad y poco mantenimiento (R. Lampo et al., 2018).



Figura 17. Primer puente de termoplásticos reciclados.

**Nota:**

El puente fue realizado mediante recursos de obra pública en Birch Hill Road en York, Maine, EE UU, en el 2011. Cuenta con un claro corto, sin embargo, soporta vehículos medianos.

**Fuente:** Imagen tomada de R. Lampo, T. Nosker, G. Nagle, S. Nemeth, K. Palutke, y L. Clark,

El primer puente termoplástico fuera de EUA se realizó en un terreno privado de Peeblesshire **Escocia en el año 2011** gracias a un proyecto conjunto entre la universidad de Cardiff y la universidad de Rutgers donde históricamente se han desarrollado materiales poliméricos para la construcción civil entre los cuales encontramos materiales reciclados. El estudio encabezado por Thomas Nosker, jefe del Centro de Materiales Avanzados en Rutgers es un ejemplo de transformar lo que parecerían desventajas en oportunidades. Este puente es un hito ya que es más amplio a diferencia de los anteriores puentes realizados en los EUA (3.7 x 27.0 m) abre la posibilidad a la reglamentación sobre el uso de materiales termoplásticos reciclados para estructuras en la construcción y demuestra que hay futuro por delante en esta área de la construcción.

En los últimos años se han realizado mejoras en los procesos de producción, mejora de calidad y consistencia del material polimérico reciclado.

En conclusión, se ha desarrollado de manera enorme los procesos de producción y de construcción con polímeros reciclados. La tecnología del reciclaje ha permitido lo anterior, por lo que se requiere mantener una actualización en el conocimiento de la aplicación de dichos materiales, los cuales aún no han sido difundidos. Se han consolidado los métodos estándar

de prueba para el rendimiento de los termoplásticos reciclados a través del comité D20 de ASTM. Es necesario promover la aceptación en el uso de este material en el mercado de la construcción como estructura.

Para que lo anterior se logre es necesario conocer a profundidad las propiedades de los materiales y los procedimientos de construcción en base al diseño. También es necesario establecer procedimientos de evaluación entre el desempeño en la construcción con la evaluación previa de laboratorio. Un análisis de costo de vida también forma parte de otro apoyo para la demostración de los beneficios de estos materiales, lo cual permitirá aprovechar las características y sus específicos de los termoplásticos.

*En general a lo largo de esta investigación se ha buscado información para el desarrollo de materiales de construcción que sean una alternativa sustentable a otros, como madera y acero, aplicados cubiertas de gran claro y en sí con uso estructural para combatir la costosa corrosión y biodegradación que es un problema constante en entornos que podemos encontrar dentro de la Ciudad de México.*

**Termoplásticos reforzados por fibra de vidrio, aplicaciones en pilas marítimas, así como ambientes húmedos y corrosivos:** los compuestos de polímero reforzado con fibra (FRP) representan un material de construcción alternativo que puede aliviar el deterioro del acero, hormigón y pilotes de madera en entornos marinos, frente al agua y agresivos. En el estudio realizado en el 2012 por Amir Bozorg-Haddad, Magued Iskander y Yufan Chen, titulado Resistencia a la compresión y fluencia de PEAD reciclado utilizado para fabricar pilotes poliméricos, se analiza la resistencia a la compresión del PEAD reciclado, aplicado para la conformación de pilotes marítimos. Se utilizó un método de prueba acelerado para predecir la fluencia por compresión de PEAD reciclado. Los resultados de la prueba indican que el PEAD probado cargado en compresión se deslizará menos del 1% en 100 años cuando se carga a un esfuerzo máximo de 6,9 MPa (1000 psi). La resistencia máxima del PEAD reciclado probado en esta investigación es de 11.7 MPa a 100 años de servicio. Las jarras para leche que podrían convertirse en residuo se han utilizado para formar la materia prima (PEAD reciclado) que produce los pilotes marítimos (Bozorg-Haddad et al., 2012). Para la formación de dichos pilotes se utilizan termoplásticos reforzados por fibras como las de vidrio E, para mejorar las propiedades

mecánicas. Debido a las cargas los pilotes marítimos de este estudio son propuestos para cargas ligeras o medianas como las residenciales.



Figura 18. Fabricación de pilotes marítimos, con matriz polimérica termoplástica.

### Uso de termoplásticos en pilotes marítimos

El deterioro de los pilotes convencionales ha sido un problema, con un costo de casi mil millones por año de reparación y sustitución (R. Lampo et al., 1998). El uso de pilotes hechos a base de polímeros tiene ventajas en cuanto a la corrosión y ataque de insectos. Por ejemplo, esta solución, tiene el potencial para utilizar 12 millones de Toneladas de envases de plástico rígido que concluirían su vida útil en vertederos (Bozorg-Haddad et al., 2012). Se ha descubierto que los polímeros tienen una mayor durabilidad a los materiales convencionales de construcción, bajo ambientes agresivos.

A pesar de las ventajas que representan los polímeros en la fabricación de pilotes marítimos, su uso no se ha extendido, debido a que se requiere una mayor investigación para su aplicación cotidiana.

No existen estándares para predecir el deslizamiento por compresión de polímeros. Para geo sintéticos poliméricos, el comportamiento de fluencia es típicamente evaluado de acuerdo con ASTM D5262, que requiere meses en tiempo de prueba para obtener datos a temperatura ambiente.

A pesar de que ASTM D5262 permite extender los datos de fluencia en un ciclo de registro (por ejemplo, de 10,000 a 100,000 hrs), lo anterior, no es práctico para predecir el comportamiento tras 50 o 100 años. La alternativa ha sido desarrollar un método de prueba acelerado. Hay tres variables que afectan la magnitud de la fluencia; estrés, temperatura y tiempo. Cuando la temperatura es constante, viscoelástica

la fluencia se simplifica típicamente; como primario, fluencia secundaria y terciaria que conduce a la rotura. En EE. UU. y en el resto del mundo las agencias y entidades gubernamentales, entre otras empresas, que podrían ser grandes consumidores de los productos con plásticos reciclados para aplicaciones en la construcción, no han podido comprarlos porque no existen especificaciones y pautas de adquisición establecidas basadas en el desempeño.

## 2.7 Aplicaciones en la industria aeroespacial y automotriz

Las técnicas de moldeo por inyección permiten la producción de un gran número de piezas en ciclos cortos. Esto, a partir de elevar un termoplástico por encima de su punto de fusión (Wallenberger & Bingham, 2010). Al conformar los termoplásticos, pueden sufrir un cambio químico como disminución del peso molecular, pero se conserva su capacidad de flujo (conformación) cuando se excede la temperatura requerida.

Sin utilizados gránulos sólidos formados mediante la dispersión de fibras de vidrio en un polímero termoplástico fundido.

Se puede utilizar una inyectora con dos puertos de alimentación, donde en una se coloquen fibras continuas (no necesariamente cortas) ya que la acción de los tornillos permite obtener un resultado de longitud similar al de las fibras cortas.

Los polímeros termoplásticos reforzados más comúnmente son poliamidas, poliésteres y polipropileno el cual es el más utilizado. Este último, comparte similitudes de estructura molecular con el polietileno de alta densidad.

Se han utilizado refuerzos a partir de fibra de vidrio larga (LFRT *long fiber-reinforced thermoplastics*) y fibra de vidrio en lámina o tapete (GMT *glass-mat thermoplastics*). Los tapetes de fibra de vidrio que refuerzan termoplásticos (GMT), son láminas consolidadas que contienen matrices termoplásticas reforzadas con fibra unidireccional, orientada al azar, picada

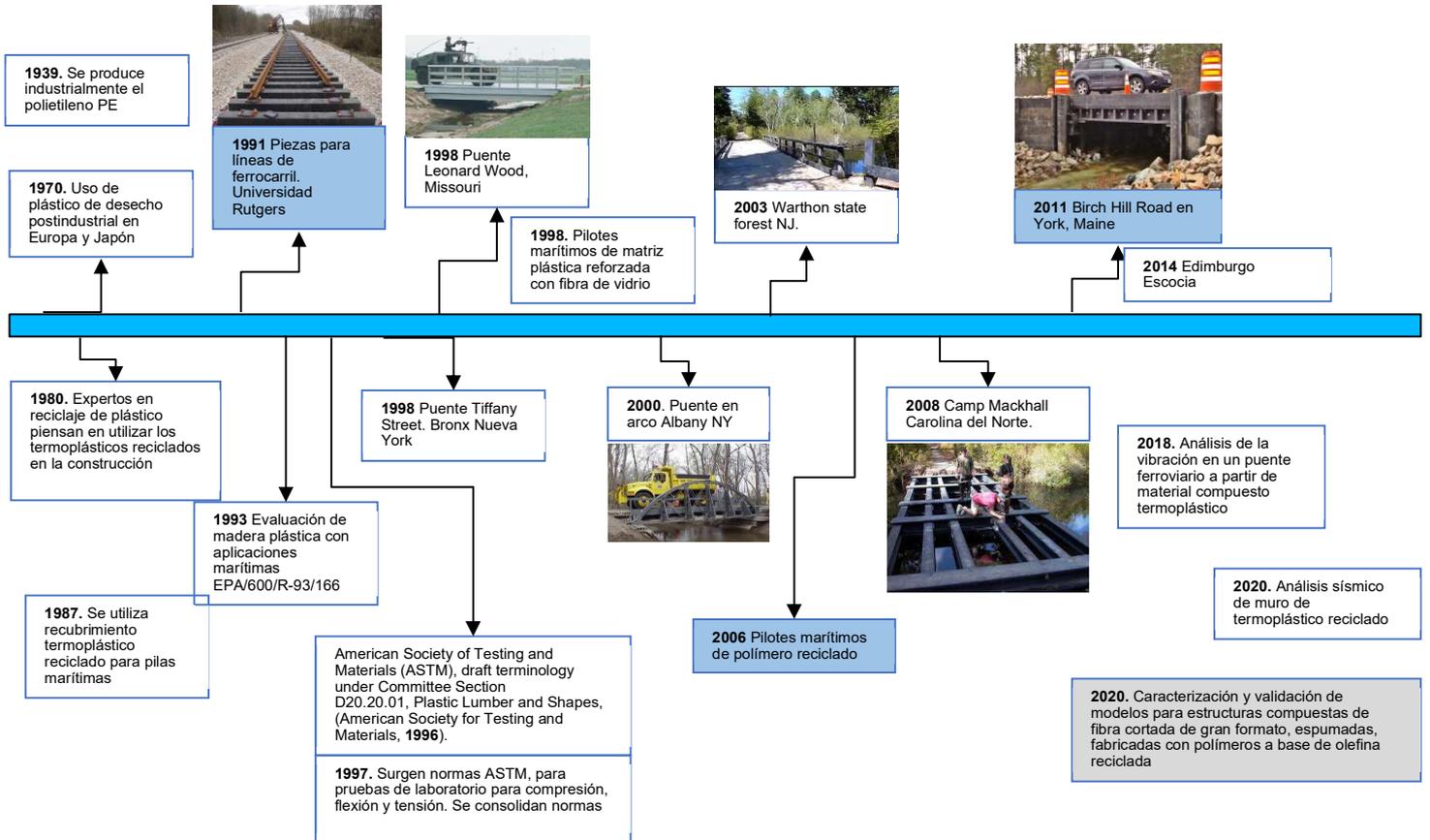
larga y/o continuo de esteras de fibra de vidrio. Antes del moldeo, las láminas se calientan en un horno de infrarrojos por encima del punto de fusión de la resina que es la matriz y luego se transfiere caliente a un molde de compresión frío para formar parte del acabado.

El proceso de producción de fibras largas (LFRT) se puede realizar al impregnar un termoplástico con fibra de vidrio, dejar enfriar y posteriormente cortar el material resultante en gránulos que tienen forma de varilla de 6 a los 25 mm. Esto permite su uso en moldeo por inyección.

Otra forma de uso es eliminar el proceso de producción de pellets. Se pueden obtener longitudes mayores de fibra al introducirla mediante un proceso en línea, por moldeo de inyección o compresión.

Materiales compuestos de matriz termoplástica (PA, PBT y PP) y un 30 % de fibra de vidrio han mostrado aumento en la resistencia a la tensión de hasta el 200%. Aumento en la resistencia al impacto de hasta el 300% en el polipropileno (PP). El tamaño de la fibra es importante para la eficacia de la interfaz entre la matriz y la fibra. Las propiedades térmicas también han demostrado tener mejora para compuestos semicristalinos. Sin embargo, para matrices termoplásticas amorfas como el policarbonato, no se muestran mejoras significativas en la estabilidad térmica.

## 2.8 Línea de tiempo historiográfica



### 3 DISEÑO EXPERIMENTAL DEL MATERIAL PEAD CON FIBRA DE VIDRIO

Este capítulo contiene los fundamentos para métodos de prueba realizados en el material compuesto de polietileno de alta densidad reciclado reforzado por fibra de vidrio. El método experimental forma parte de la planeación y procedimientos normados para obtener los resultados de las propiedades del material propuesto, con el objetivo de aplicarlos en un modelo de análisis estructural, que permita conocer el comportamiento ante diversos factores del entorno. Posterior al diseño del material compuesto y su fabricación, se realizaron las pruebas de laboratorio para obtener las propiedades físicas y térmicas, para proponer el procedimiento de producción; también, las pruebas para obtener los esfuerzos a tensión y compresión, los cuales son necesarios para el análisis de una armadura que forme parte de una cubierta.

#### 3.1 Método experimental

En el método experimental se definió las proporciones del material compuesto, fundamentado en los conceptos de ciencia e ingeniería de los materiales explicado en el capítulo 1, así como en la regla de las mezclas para materiales compuestos. Se concluyó que la mezcla sería 70% polietileno de alta densidad reciclado con 30% de fibra de vidrio corta. Al fabricar las probetas con esa proporción se obtuvieron las piezas con las características esperadas para ser probadas. El material PEAD reciclado reforzado por fibra de vidrio, presentó adherencia entre matriz y fibra sin desprendimiento superficial, posteriormente a su fabricación por moldeo de inyección. Posteriormente, se realizaron las pruebas de laboratorio, tanto físicas como mecánicas. Los resultados fueron analizados e interpretados de forma estadística, para la introducción de los resultados en un modelo de análisis estructural. Se finalizó con la obtención de las dimensiones de los perfiles de la estructura.

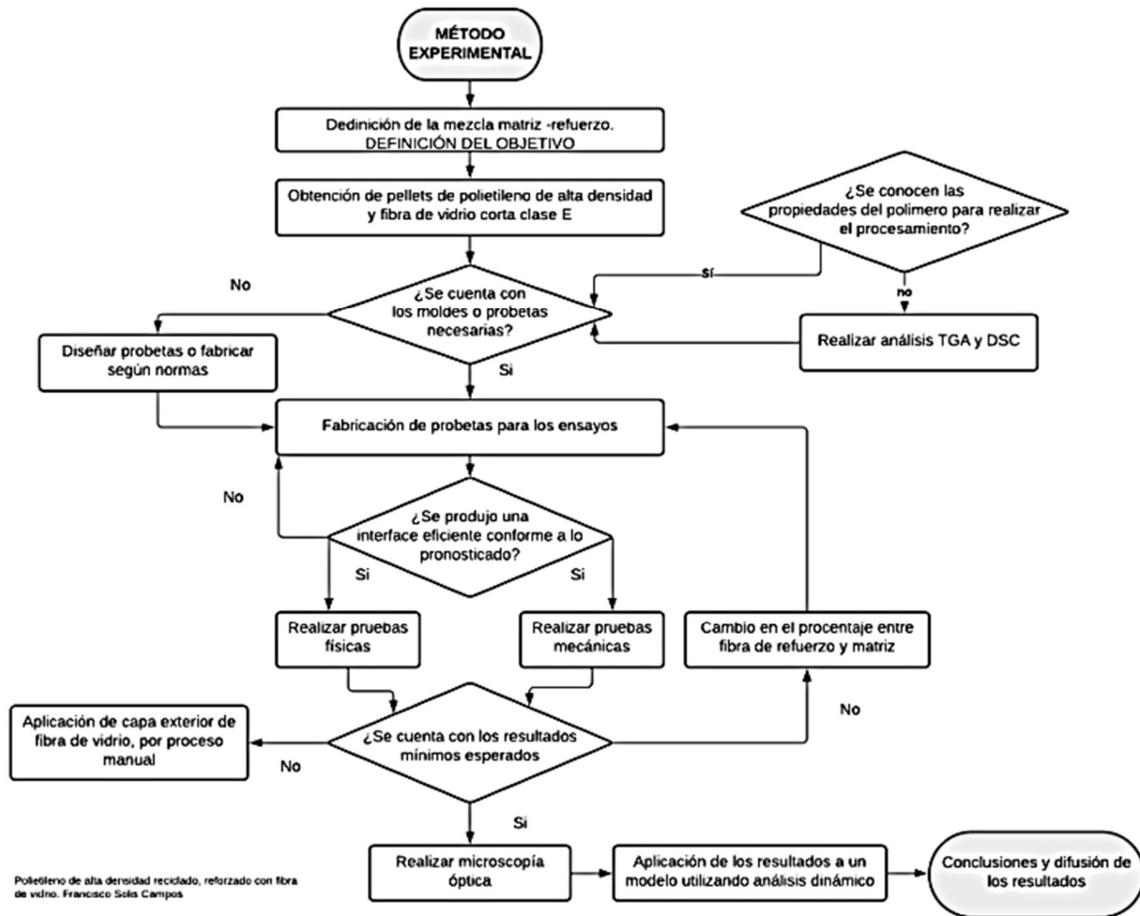


Figura 19. Diagrama del método a implementar en la investigación.

**Nota:**  
Elaboración propia.

### 3.2 Materiales utilizados

En capítulos anteriores se ha abordado las razones para la utilización del polietileno de alta densidad como matriz. Este plástico se sitúa en el segundo lugar de producción y consumo en México. Alrededor del mundo también resulta uno de los más producidos y consumidos (Hoorweg & Bhada-Tata, 2012).. La sustitución de la madera como material en la construcción, se ha encontrado en termoplásticos reciclados que han servido para producir, por ejemplo, la madera plástica, utilizada principalmente para muebles de jardín o barandales al exterior. Su resistencia a la humedad y corrosión es amplia, en comparación con materiales metálicos. Sus propiedades mecánicas a tensión y compresión en estado virgen resultan aptas para

aplicaciones ligeras de carga, lo cual resulta en facilidad para procesos constructivos. Ha demostrado tener propiedades que lo hacen apto para uso ante golpes, como en durmientes para líneas de ferrocarril, reductores de velocidad o protecciones contra impacto en autos y estructuras (R. Lampo et al., 2018)

Al incorporar un refuerzo o la unión de otro material que produzca propiedades que no tendrían individualmente, se forma un material compuesto, el cual es diseñado para un propósito definido. Es por ello, que se ha elegido la incorporación de fibras para refuerzo, con el objetivo de proporcionar mejora en las propiedades mecánicas, mantener la ligereza del material, y contra restar los efectos de la fluencia lenta y la relajación de esfuerzos que pueden limitar el tiempo útil de los perfiles. Es por ello, que se ha optado por el uso de la fibra de vidrio, la cual, además de tener las anteriores características, resulta económica.

### Polietileno de alta densidad reciclado

El PEAD es un polímero<sup>1</sup> termoplástico<sup>2</sup>, el cual fue suministrado por la empresa Plásticos del Futuro S.A de C.V en forma de pellets reciclados. Las propiedades mecánicas del PEAD reciclado pueden ser del 90%, respecto al virgen, tras el proceso de reciclaje (Goodship, 2007). Este material será utilizado como matriz, en un porcentaje del 80%. La matriz tendrá la función de aglomerar y proporcionar el primer contacto del material con el medio, por lo que recibirá las acciones de la intemperie o medio en el cual se encuentre inmerso el compuesto. También transferirá las cargas al compuesto y en general a la fibra de refuerzo.

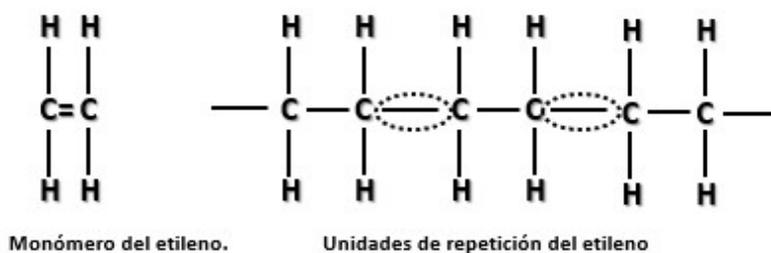


Figura 20. Monómeros y su repetición para formar polímeros.

<sup>1</sup> Material formado por la repetición y unión de monómeros, para producir cadenas gigantes de gran peso molecular llamados polímeros

<sup>2</sup> Son una rama de los polímeros, clasificados por su comportamiento ante el calor el cual afecta sus propiedades mecánicas. Al llegar a la temperatura de fusión se ablandan, entran en un estado semilíquido donde pueden ser conformados debido a su flujo viscoso. Al enfriarse lo suficiente adoptan un estado sólido (temperatura de transición vítrea). Los termoplásticos se distinguen de los termoestables y elastómeros por su capacidad de re conformarlos ante la acción del calor (reciclaje).

Su temperatura de fusión ( $T_m$ ) se encuentra entre los 130 a 137 °C (Polietileno de alta densidad, s. f.-a), en otros casos se confirma un resultado aproximado de 135 °C (Goodship, 2007). Se descompone a temperaturas superiores a los 290 °C.



Figura 21. Pellets de polietileno de alta densidad.

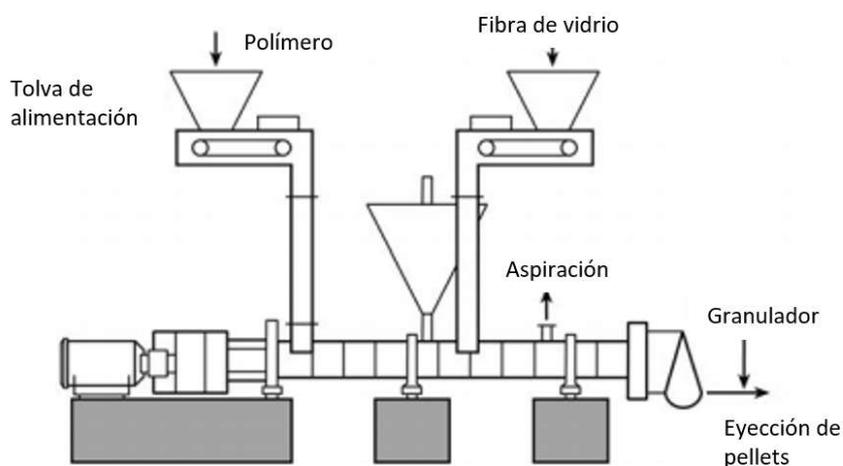


Figura 22. Producción de pellets polímero – fibra de vidrio. Tomada de F. T. Wallenberger y P. A. Bingham, *Fiberglass and glass technology: energy-friendly compositions and applications*. Springer, 2010

**Fibra de vidrio corta tipo E.** La fibra de vidrio es un material que consta de numerosos filamentos cerámicos basados en dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ). Para esta investigación se utilizará fibra de vidrio corta, clase E, fabricada por la empresa Poliformas Plásticas S.A de C.V. La función de la fibra de vidrio es mejorar las capacidades mecánicas del compuesto, como la resistencia a la compresión y tensión. Es un material amorfo con propiedades isotrópicas<sup>3</sup>(Gupta & Kothari, 1997).

Debido a sus propiedades térmicas las cuales, son mayores en temperatura de fusión que el PEAD, esta fibra puede ser utilizada y mezclada dentro del material compuesto.



Figura 23. Fibra de vidrio corta clase E.

**Fuente:** Imagen tomada de: [https://www.alibaba.com/product-detail/short-glass-fiber-chopped-strands-for\\_508895756.html](https://www.alibaba.com/product-detail/short-glass-fiber-chopped-strands-for_508895756.html)

## 3.2 Diseño de la experimentación

### 3.2.1 Propiedades mecánicas esperadas

**Propiedades teóricas del polietileno de alta densidad.** A continuación, se muestran las propiedades promedio del polietileno de alta densidad, las cuales son comunes en el polímero virgen.

<sup>3</sup> Sus propiedades son las mismas a lo largo y ancho de la fibra (a diferencia de la fibra de carbono, cuya estructura molecular hace que sus propiedades sean diferentes a lo largo y ancho, es decir, anisotrópicas).

<b>Propiedades mecánicas del polietileno de alta densidad</b>	
Módulo elástico	1.07 a 1.09 GPa
Resistencia mecánica a la compresión	18.6 - 24.8 MPa
Resistencia mecánica a la flexión	30.9 - 43.4 MPa
Resistencia mecánica a la tensión	22.1 - 31 MPa
Tenacidad a la fractura	1.52 - 1.82 MPa m <sup>1/2</sup>
Comportamiento a la tensión a temperatura ambiente	10% al 120%
Dureza a temperatura ambiente	7.9 a 9.9 HV
<b>Propiedades físicas del polietileno de alta densidad</b>	
Densidad	952 y 0.965 g/cm <sup>3</sup>
Cristalinidad	del 80% al 70%
Resistividad eléctrica específica a temperatura ambiente	1e13 - 1e17 ohm m
Constante dieléctrica a temperatura ambiente	2.2 - 2.4
Temperatura de fusión	130 a 137 °C
Coefficiente de dilatación térmica lineal a temperatura ambiente	60e-6 - 110e-6 1/ °C
Conductividad térmica a temperatura ambiente	0.461 - 0.502 W/m K
<b>Capacidad calorífica específica a temperatura ambiente</b>	1.75e3 - 1.81e3 J/kg K

Tabla 1. Propiedades del polietileno de alta densidad. Fuente: <http://www.ub.edu/cmematerials/es/materials>

- QUÍMICAS
- Es resistente a ácidos débiles, así como a fuertes (en menor medida a estos últimos)
- Tiene resistencia a los álcalis fuertes y débiles
- Tiene resistencia media a los disolventes orgánicos
- Es resistente a la radiación ultravioleta
- Es resistente a la humedad, no se altera en presencia de agua dulce o salada
- Tiene una considerable sensibilidad a la tenso-fisuración, especialmente en presencia de tensioactivos, alcoholes, ácidos orgánicos, aceites de silicona, aceites esenciales y álcalis acuosos. Se trata de un material inflamable.

A continuación, se muestran las propiedades teóricas de la fibra de vidrio.

<b>Propiedades de la fibra de vidrio</b>	
Densidad	2.54 – 2.62 g/cm <sup>3</sup>
Coefficiente de expansión térmica	4.9-6.0 x 10 <sup>-6</sup> m/m/K
Calor específico	0.8 KJ/Kg K
Temperatura de fusión	830 – 916 °C
Conductividad térmica	1.0 W m/K
Índice de refracción	1.547 – 1.560
Resistencia a la tensión	3.1 – 3.8 GPa
Resistencia a la compresión	1.08 GPa

Módulo de tensión	76 – 81 GPa
Ruptura a la elongación	4.5 – 4.9 %

Tabla 2. Propiedades de la fibra de vidrio. Fuente: <http://www.ub.edu/cmematerials/es/materials>

(Polietileno de alta densidad, s. f.-b).

Mediante la regla de las mezclas en los compuestos reforzados por fibras se pueden determinar propiedades físicas y mecánicas de los materiales, lo cual resulta útil para tener un parámetro teórico que permita obtener un diseño de mezcla inicial. Las matrices poliméricas a pesar de no poder desempeñar un papel estructural en la resistencia de cargas, juega 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.

Al considerar un material reforzados por fibras unidireccionales y se asume que existe continuidad estructural entre las fases (matriz y refuerzo), lo cual significa que las interfaces entre la matriz y fibra permanecen íntegras y permiten la transmisión de las cargas. Las fuerzas totales que se transmiten se reparten entre la matriz y fibra.

La resistencia a un estímulo de un material compuesto reforzado con fibras unidireccionales en consideración de su fracción volumétrica se obtiene mediante las siguientes expresiones para la conductividad térmica y para la eléctrica

$$\sigma_c = \sigma_f (A_f/A_c) + \sigma_m (A_m/A_c) \text{ lo cual es lo mismo que } \sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m$$

$$k_c = k_f V_f + k_m V_m \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

$\sigma_c$ = conductividad eléctrica del material compuesto

$\sigma_f$ = conductividad eléctrica de la fibra

$\sigma_m$ = conductividad eléctrica de la matriz

$A_m$  = área transversal de la matriz

$A_f$  = área transversal de la fibra

$V_f$  = contenido volumétrico de fibra

$V_m$  = contenido volumétrico de matriz

$K$ = conductividad térmica

En el caso de la densidad también se puede aplicar la misma fórmula que en los compuestos particulados

$$\rho_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad \text{Ecuación 9}$$

Los subíndices f y m, se refieren a la fibra y a la matriz respectivamente. También se puede observar que

$$V_m = 1 - V_f \quad \text{Ecuación 10}$$

Cuando las fibras son continuas o unidireccionales se puede aplicar la ley de las mezclas. Para el sentido paralelo a las fibras se utiliza la siguiente fórmula:

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \quad \text{Ecuación 11}$$

Cuando el esfuerzo es muy grande la matriz comienza a deformarse y la curva esfuerzo – deformación ya no es lineal, debido a que la matriz contribuye poco a la rigidez. En ese caso el módulo de elasticidad se puede calcular directamente con el del refuerzo:

$$E_c = E_f V_f \quad \text{Ecuación 12}$$

Cuando la carga se aplica perpendicularmente al refuerzo de las fibras, la matriz y la fibra actuarán de forma independiente, por lo cual se utiliza la siguiente ecuación:

$$1/E_c = V_m/E_m + V_f/E_f \quad \text{Ecuación 13}$$

Lo anterior expuesto, deja como conclusión que en un compuesto de matriz polimérica se pretende obtener la mayor cantidad de fibra. Una fracción mayor de fibra incrementa la rigidez y resistencia del compuesto. Ronal Askeland en su libro ciencia e ingeniería de los materiales, menciona que el volumen máximo de fibras es aproximado al 80 %, con motivo de que el refuerzo quede rodeado completamente por la matriz.

Mediante el proceso de producción de impregnación manual se pueden alcanzar valores cercanos al 40 % con una notable dispersión en los distintos puntos del material. Es por ello que se emplean pre impregnados, en los cuales la impregnación de resina es homogénea. Llega a ser del 60% en laminados en cinta y 50% en tejidos convencionales.

La importancia del aporte de la matriz radica en la resistencia a la rotura. Las fibras rotas pueden transmitir su carga correspondiente a fibras vecinas mediante la matriz, lo cual es semejante a lo que sucede en el trenzado de cables.

En ausencia de la matriz las fibras se ondularían lateralmente en una inestabilidad elástica, haciendo imposible que el conjunto de fibras sea

capaz de soportar carga a compresión. Evita el desplazamiento lateral sin absorber directamente las cargas.

Las propiedades de un material compuesto están determinadas por las de sus componentes individuales, fracciones o masas volumétricas, la calidad de su unión que se refiere al comportamiento de las interfaces, y por la disposición y distribución del refuerzo de fibra. Las suposiciones básicas hechas en los modelos de enfoque de ciencia de materiales de fibras reforzadas compuestos son:

- La unión entre fibras y matriz es perfecta.
- Las fibras son continuas y paralelas alineadas en cada capa, se empaquetan regularmente,

es decir, el espacio entre las fibras es uniforme.

- Los materiales de fibra y matriz son elásticos lineales, siguen aproximadamente el principio de Hooke.

ley y cada módulo elástico es constante.

- El compuesto está libre de vacíos.

Por lo anterior, el proceso de fabricación de forma estricta y con la calidad prevista, es necesario para que la regla de las mezclas pueda permitir un pronóstico de las propiedades. De lo contrario, las desviaciones en la producción pueden producir defectos en el material que no permita mantener un modelo, ni una comparativa entre los fabricados y lo planeado.

En el caso de las fibras cortas dispuestas al azar se utilizarán las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_t = x_1 * x_2 * v_f * \sigma_f + (1 - v_f)\sigma_m \quad \text{Ecuación 14}$$

$$E_t = x_1 * v_f * E_f + (1 - v_f)E_m \quad \text{Ecuación 15}$$

$$\sigma_c = x_1 * x_2 * v_f * \epsilon_m * E_f + (1 - v_f)\sigma_m \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

$V_f$ : fracción volumétrica de fibra

$\sigma_f$ = resistencia la tensión o compresión de la fibra

$\sigma_m$  resistencia a la tensión o compresión de la matriz

$\epsilon_m$ : deformación a la falla de la matriz

$E_f$ : modulo elástico de la fibra

$x_1$ : factor de eficiencia de la fibra

$x_2$ : factor de relación entre longitud crítica y diámetro de fibra.

Para un pronóstico de las propiedades se han utilizado datos de experimentaciones previas.

La resistencia a la compresión cuenta con diferentes modelos que han intentado la predicción de la propiedad. Se ha tomado como partida la ecuación descrita por Hayashi y Koyama basado en una inestabilidad de falla de corte de la matriz que había demostrado producen resultados razonables para la matriz más blanda (Bajracharya et al., 2016). Para su aplicación dentro de un material compuesto con fibras cortas al azar, se deben utilizar factores de eficiencia, basados en la aleatoriedad de la fibra y en sus dimensiones.

Para el caso de la resistencia a la tensión, también se utilizan las ecuaciones descritas para compuestos reforzados por fibras unidireccionales, con el ajuste de factores.

Los modelos matemáticos que buscan la predicción de las propiedades mecánicas y físicas de los materiales compuestos asumen procedimientos de fabricación que mantienen un enlace interfacial perfecto. Por lo cual, las micro cavidades u otros defectos de producción provocan que el modelo no se ajuste a la realidad de la fabricación. Sin embargo, se tiene un parámetro de los resultados a esperar.

Una proporción aceptable para la fabricación del material compuesto es 70 % de matriz polimérica y 30 % fibra de refuerzo, debido a que la saturación de fibra puede provocar una deficiente interface del material compuesto (Callister, 1995b).

### 3.2.2 Diseño del material compuesto PEAD reciclado – Fibra de vidrio

Se utilizará como materiales el polietileno de alta densidad (PEAD), obtenido en forma de pellets posconsumo, con código de resina 2. Fueron separados de los residuos sólidos recogidos de los hogares, industrias, servicios médicos, etc., completamente lavados y secados para eliminar cualquier contaminación o impureza, para posteriormente fueron colocados en una extrusora y granulado para obtener la materia prima (Satya & Sreekanth, 2020)

Los termoplásticos tienen la característica de ser recalentados por encima de su temperatura de fusión y remodelados en una nueva forma. Para aumentar la rigidez del polímero, las fibras de vidrio se utilizan comúnmente como refuerzo porque son económicas y fáciles de fabricar (Pulipati & Jack, 2020).

El compuesto constará de ~ 80% PEAD reciclado, ~ 20% fibra de vidrio corta clase E y negro de humo. Las máquinas inyectoras pueden contar con tres o cuatro zonas de calentamiento del producto. Los materiales se colocan en una tolva. El termoplástico se mezcla con la fibra de vidrio y se funde a una temperatura de 220 °C en la zona I, 215 °C en la zona II 210 °C en la zona III y 205 °C en la zona IV. Se debe tomar en consideración que un termoplástico reciclado cuenta con un mayor índice de fluidez que uno virgen, esto debido a la pérdida de peso molecular, por la degradación UV o por la misma temperatura de producción en anteriores ocasiones (Rodríguez-Bruceta et al., 2015). Sería posible utilizar una máquina de moldeo por inyección de 12 cc. Mientras que la mezcla se fundirá a entre 220 y 205 °C, el molde se mantendrá sin aplicación de calor, con una temperatura ambiente inicial. Lo anterior resulta importante ya que para la producción de este material se debe superar la temperatura de fusión. Una temperatura de descomposición, superior a los 250°, produciría la emisión de gases tóxicos y por lo tanto la contaminación del aire o cual no es deseado. Al concluir el tiempo de enfriamiento se abre el molde y se retira el material (es importante mencionar que al molde se le aplica cera desmoldante previo al inicio de la inyección).

En la siguiente tabla se expresan los valores necesarios para la producción:

Parámetros de producción	Zona I	Zona II	Zona III	Zona IV
Temperatura de conformación (°C)	220	215	210	205
Presión de inyección (Bar)	90	100	120	120
Velocidad de inyección (rpm)	90	90	90	90
Tiempo de enfriamiento (s)	8	10	10	12
Tiempo de espera (s)	8	8	8	15
Presión de espera (s)	90	90	110	120

Tabla 3. Valores de producción para el material compuesto a base de polietileno de alta densidad reciclado(matriz) y fibra de vidrio corta (refuerzo).

El PEAD reciclado será suministrado por la empresa Plásticos del Futuro S.A de C.V, mientras que la fibra de vidrio y aditivos serán adquiridos de Poliformas Plásticas S.A de C.V.

### 3.3 Normatividad aplicada en el proyecto

Norma	Organización	Descripción
<b>ASTM D-6108-03</b>	ASTM American Society for Testing and Materials	Standard Test Method for Compressive Properties of Plastic Lumber and Shapes
<b>ASTM D-6109-03</b>	ASTM American Society for Testing and Materials	Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastic Lumber
<b>ASTM D-638-14</b>	ASTM American Society for Testing and Materials	Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics
<b>ASTM D-6341-16</b>	ASTM American Society for Testing and Materials	Standard Test Method for Determination of the Linear Coefficient of Thermal Expansion of Plastic Lumber and Plastic Lumber Shapes Between -30 and 140°F (-34.4 and 60°C)
<b>ASTM D-6111-03</b>	ASTM American Society for Testing and Materials	Standard Test Method for Bulk Density and Specific Gravity of Plastic Lumber and Shapes by Displacement
<b>ASTM D 7031-04</b>	ASTM American Society for Testing and Materials	Standard Guide for Evaluating Mechanical and Physical Properties of Wood-Plastic Composite Products
<b>ASTM D 7032-04</b>	ASTM American Society for Testing and Materials	Standard Specification for Establishing Performance Ratings for Wood-Plastic Composite Deck Boards and Guardrail Systems (Guards or Handrails)
	International Code Council	Establecido en 1994 para proporcionar códigos, estándares, productos y servicios de la más alta calidad para todos los interesados en la seguridad y el rendimiento del entorno construido. Los fundadores de ICC son Building Officials y Code Administrators International, Inc. (BOCA), International Conference of Building Officials (ICBO) y Southern Building Code Congress International, Inc. (SBCCI).
	ICC-ES	Proporciona evaluaciones técnicas de productos, componentes, métodos y materiales de construcción. Los reguladores de la construcción, contratistas, especificadores, arquitectos, ingenieros y cualquier otra persona interesada en la industria de la construcción y la construcción buscan en los informes de evaluación ICC-ES evidencia de que los productos y sistemas cumplen con los requisitos del código.
<b>Normas técnicas complementarias del reglamento de construcciones de la Ciudad de México</b>	RCCDMX	Normas técnicas complementarias sobre criterios y acciones para el diseño estructural de las edificaciones

Tabla 4. Normatividad aplicada al Proyecto.

La normatividad aplicada a la investigación tiene como objetivo, determinar los procedimientos para la producción del material compuesto estudiado; la realización de pruebas de laboratorio en ambientes controlados y la aplicación dentro de la arquitectura. La finalidad es obtener un trabajo de investigación, de experimentación y de aplicación con utilidad en la Ciudad de México y zona que cumplan con condiciones geográficas similares.

### 3.4 Propiedades del material. Pruebas de laboratorio

La información resultante de las pruebas en laboratorio servirá para la caracterización del material (*la caracterización consiste en la obtención de información de un material a partir de la interacción de una señal, con este material*). En el caso de esta investigación se realizarán pruebas mecánicas a compresión, tensión, determinación del coeficiente de expansión térmica lineal, prueba de gravedad específica (peso volumétrico) y análisis térmicos (análisis termogravimétrico y escaneo diferencial de barrido).

Con base en las normas ASTM del comité D 20, aplicadas a plásticos y plásticos reciclados, así como formas de madera plástica, se realizaron las pruebas mecánicas a través de las cuales se determinó las propiedades de módulo elástico (Kg/cm<sup>2</sup>); módulo secante al 1% (Kg/cm<sup>2</sup>); esfuerzo a una deformación del 3% (Kg/cm<sup>2</sup>); esfuerzo límite elástico (Kg/cm<sup>2</sup>); esfuerzo máximo a compresión y a tensión. del material compuesto de PEAD reciclado reforzado con fibra de vidrio. Dichas pruebas fueron realizadas en el Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales de la Facultad de Arquitectura de la UNAM, con el apoyo del Mtro. Antonio Tahuitón Mora y el Dr. Alberto Muciño Vélez.

En el caso de los análisis térmicos se obtuvo la estabilidad térmica del material, temperatura a la cual comienza la pérdida de masa y la degradación, flujo de calor por unidad de masa, temperatura de fusión y temperatura de cristalización, así como parámetros para la producción. Dichos análisis se realizaron con en el Laboratorio de Análisis Térmicos del Instituto de Investigaciones en Materiales UNAM, con el apoyo de la I.Q. Karla Eriseth Reyes Morales y el Dr. Mikhail Zolotukhin.

Prueba	Dimensiones de probeta	Número de probetas	Velocidad de la prueba	Duración esperada	Falla	Resultados esperados
Compresión. ASTM D-6108	3x3x6	10	6 mm/min	1 - 5 min		247.69 Kg/cm <sup>2</sup>
Tensión. ASTM D-638	Imagen 1	10	1.25 mm/min	0.5 - 5 min	Falla	217 Kg/cm <sup>2</sup>

Densidad ASTM D-6111	3x3x6	10		10 min	Peso volumétrico y gravedad específica	1.055 g/cm <sup>3</sup>
Expansión térmica ASTM D-6341	2.5x2.5x25	10	Prueba temperatura alta. Prueba temperatura baja	40 min		7.85 E-05

Tabla 5. Definición del tamaño de la muestra y parámetros de prueba para la caracterización mecánica. Normas ASTM del subcomité D20.20.

### 3.4.1 Ensayos de compresión

Se utilizó la norma ASTM D-6103, la cual aplica a formas de madera plástica cuando la sección transversal se carga a compresión con tasas relativamente bajas y uniformes de esfuerzo o carga. Se emplearon las muestras del material tal como se fabrica.

Las dimensiones propuestas para las probetas donde se determinará la resistencia a la compresión de la mezcla, fueron de 2.54 x 2.54 x 5.08 cm.

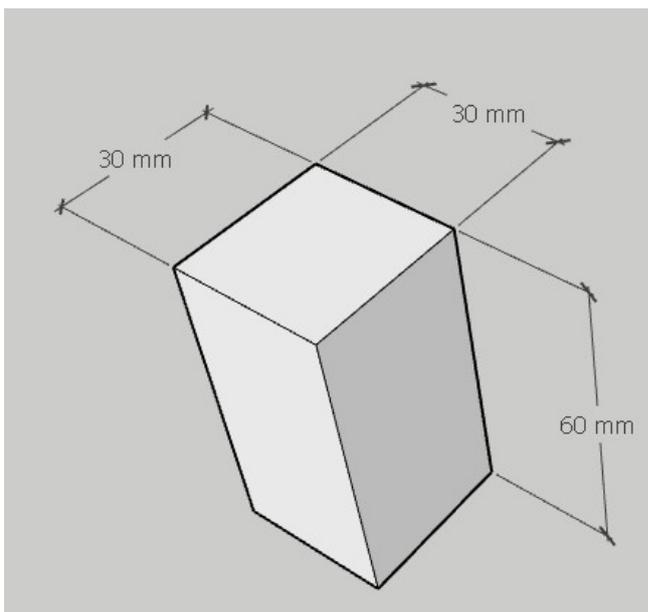


Figura 24. Dimensiones planeadas de la probeta según especificaciones de la norma ASTM D 6108-03.

**Nota:**

Las medidas son corroboradas y registradas antes de la realización de las pruebas mecánicas.

**Fuente:** Elaboración propia.

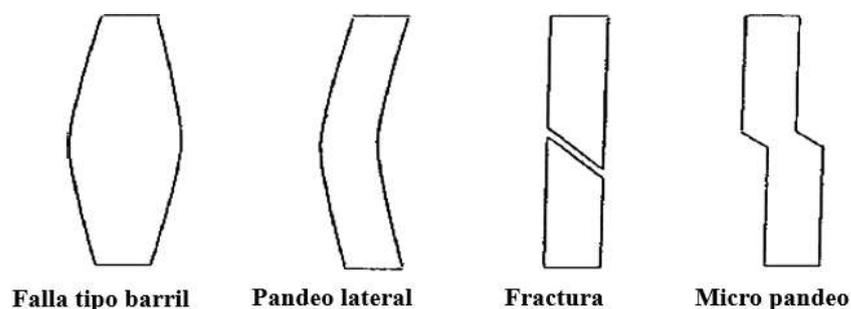


Figura 25. Tipos de falla de acuerdo a la norma ASTM D 6108-03.

Antes de realizar la prueba, se realizó la medición, con un micrómetro que pudo tener la exactitud solicitada por la norma. A pesar de que se requieren 5 probetas, fueron fabricadas 10, con el motivo de disminuir la desviación estándar y errores por fabricación.

Conforme a los resultados encontrados según las pruebas hechas a perfiles de plástico reciclado, utilizados para pisos y barandales, así como de polímero virgen, se exponen los resultados esperados para el material compuesto, objeto de esta investigación, lo cual se muestra en la *tabla 2*.

Kg/cm <sup>2</sup>		Plastic lumber yard	Plastimadera	Polímero virgen	Esperados (ROM)
Resistencia compresión	a la	100	132.13	214.96	237.83
Módulo		3585	4836.26	10800	7926.77

Tabla 6. Valores de PEAD reciclado, polímero virgen y resultados esperados.

	Unidad	C-01	C-02	C-03	C-04	C-05	Promedio	Desviación estándar	% desviación
Módulo elástico	Kg/cm <sup>2</sup>	6,055.301	6,115.201	6,954.228	6,674.349	5,701.734	6,300.163	505.000	8.016%
Esfuerzo al límite elástico	Kg/cm <sup>2</sup>	128.996	146.083	137.260	138.310	115.026	133.135	11.795	8.860%
Esfuerzo a una deformación de 3%	Kg/cm <sup>2</sup>	187.00	189.48	199.44	191.22	195.55	191.22	4.960	2.594%
Esfuerzo a ruptura	Kg/cm <sup>2</sup>	223.44	226.77	256.56	229.33	247.45	236.71	14.48	6.117%
Deformación a ruptura	%	0.150	0.140	0.140	0.140	0.140	0.142	0.004	3.149%
Sección	cm <sup>2</sup>	5.981	6.197	6.150	6.043	6.082	6.091	0.085	1.402%
Densidad	g/cm <sup>3</sup>	1.045	1.046	1.055	1.047	1.051	1.047	0.00415	0.396%

Tabla 7. Resultados de las pruebas de laboratorio, para esfuerzos a compresión.

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

- Esfuerzo máximo de 247.45 Kg/cm<sup>2</sup>. Similar a ROM
- Esfuerzo a una deformación 3% y límite elástico, mayor que madera plástica, el cual es 191.22 Kg/cm<sup>2</sup>.
- Material de baja densidad que presenta un comportamiento dúctil
- Comportamiento viscoelástico ante una deformación posterior al 3%.
- Deformación tipo barril (ASTM D-6108).

El resultado de la ecuación para pronosticar el esfuerzo máximo, presenta una alta correlación con los resultados obtenidos.

El resultado de la densidad (1.05 g/cm<sup>3</sup>), también presenta un dato cercano a la media obtenida.

Las probetas presentaron un esfuerzo elástico hasta 133.135 Kg/cm<sup>2</sup>.



Figura 26. Medición de piezas para pruebas de laboratorio.

Variable	N	N*	Media	Error estándar de		Desv.Est.	Varianza	CoefVar	Mínimo	Mediana	Máximo
				la media							
δ	5	0	1.0488	0.00185		0.00415	0.00002	0.40	1.0450	1.0470	1.0550
σ C	5	0	236.71	6.48		14.48	209.68	6.12	223.44	229.33	256.56

Tabla 8. Datos estadísticos para las pruebas de laboratorio a compresión.

Se realizó una prueba 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.



Gráfica 1. Esfuerzo - deformación, para pruebas a compresión.

$$\sigma_f = x_1 * x_2 * v_f * \sigma_f + (1 - v_f)\sigma_m$$

El resultado de la ecuación para pronosticar el esfuerzo máximo, presenta una alta correlación con los resultados obtenidos (239.70 Kg/cm²).

$$\sigma_c = x_1 * x_2 * v_f * \epsilon_m * E_f + (1 - v_f)\sigma_m$$

El resultado de la densidad ( $1.055 \text{ g/cm}^3$ ), también presenta un dato cercano a la media obtenida. Las probetas presentaron un esfuerzo elástico hasta  $99.02 \text{ Kg/cm}^2$ .

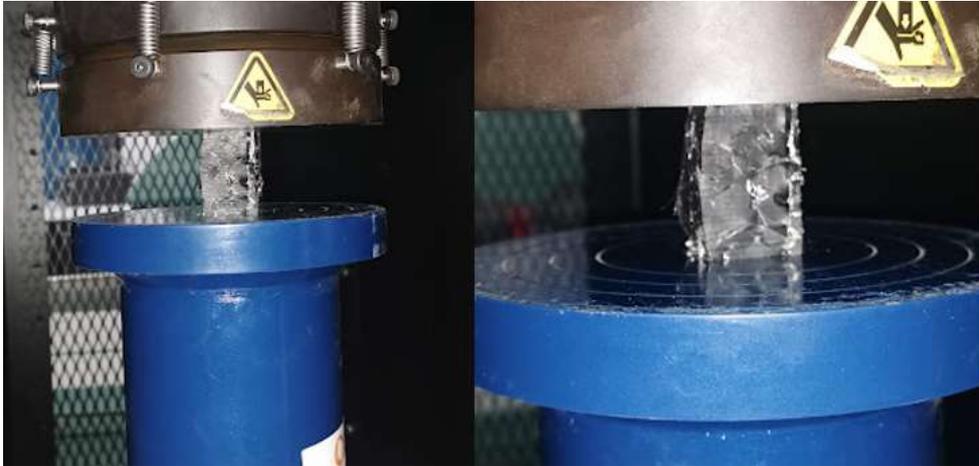
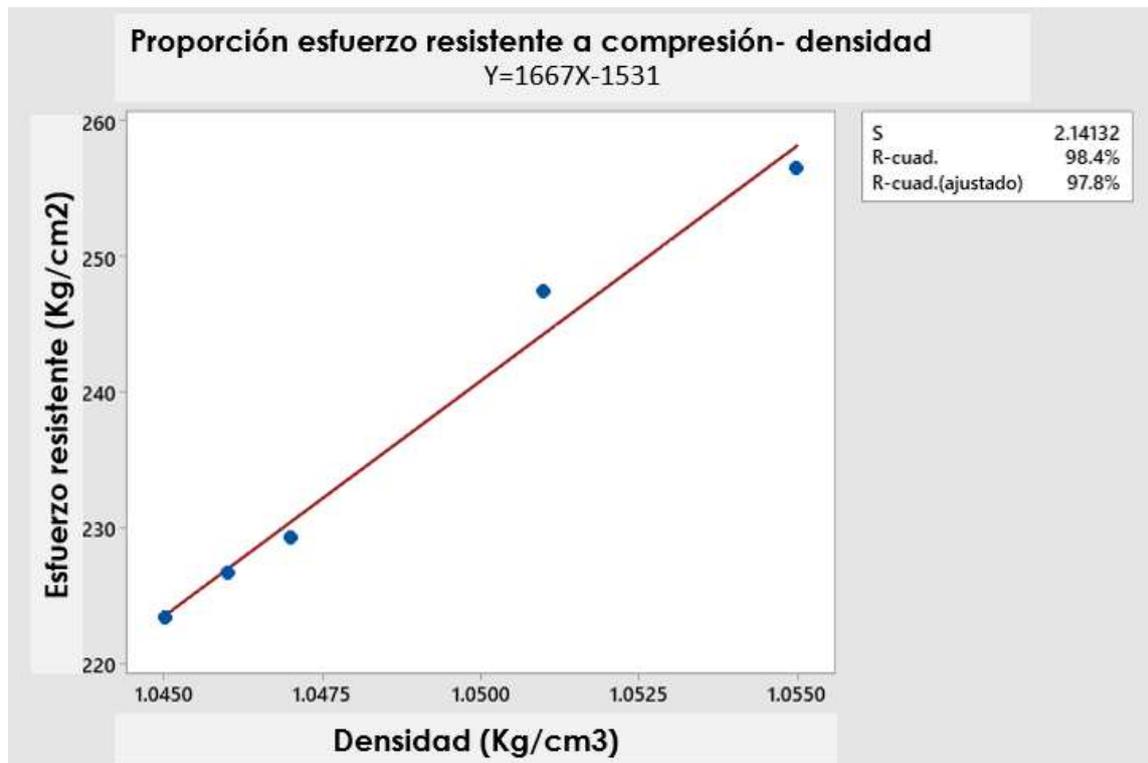


Figura 27. Pruebas de laboratorio a compresión realizadas en el LMSE de la Facultad de Arquitectura UNAM

Como conclusiones se puede observar que se presentan valores superiores a los obtenidos de la madera plástica. El comportamiento de las piezas es similar, lo cual se puede observar en la base de datos y en la gráfica de esfuerzo deformación (así como, en las gráficas esfuerzo – deformaciones obtenidas directamente de la máquina de pruebas ver anexo 1). El comportamiento del material cuando presenta falla es de tipo barril, según lo determinado por la norma.

Conforme a los objetivos planteados se ha realizado un análisis estadístico de los resultados obtenidos, así como una gráfica de regresión, donde se toma en cuenta la densidad y el esfuerzo a un 3% de la formación y el esfuerzo máximo, para encontrar la correlación y el error de la raíz media cuadrática.



Gráfica 2. Grafica de regresión lineal entre esfuerzo resistente a compresión y densidad.

## Estadísticas

Variable	N	N*	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Varianza	Mínimo	Mediana	Máximo
Densidad	6	0	1.0464	0.00209	0.00512	0.00003	1.0390	1.0462	1.0550
Resistencia	6	0	213.78	3.52	8.63	74.54	202.99	212.77	229.46

Tabla 9. Datos estadísticos de la regresión lineal entre la densidad y la resistencia a la compresión con una deformación del 3%.

**Nota:**

Resultados producto de las pruebas de laboratorio.

**Fuente:** Elaboración propia.

La correlación entre la densidad del material y la resistencia a la compresión, son altas al tener un valor de 0.978, el cual es cercano a 1, por lo cual se observa un aumento en la resistencia con relación a la fracción volumétrica de la fibra.

Los diferentes esfuerzos obtenidos de la experimentación permiten conocer las propiedades del material, así como los valores a utilizar para el análisis estructural. Se tomará el esfuerzo a una deformación dada del 3%, que es donde se encuentra la deformación viscoelástica (deformación transitoria con regreso lento) (Salcedo Cortés et al., 2015).

### 3.4.2 Ensayos de tensión

#### Método de prueba

Los ensayos realizados se hicieron con base en la norma ASTM D638-14 Método de prueba estándar para las propiedades de tensión de los plásticos. Con estos ensayos se determinan las propiedades de tensión para los materiales plásticos reforzados o no, bajo condiciones definidas de pretratamiento, 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.

Este método de prueba es aplicable para materiales de grosor hasta 14 mm. El método de prueba incluye la opción de determinar el módulo de Poisson a temperatura ambiente. La norma ISO 527-1, aborda también el mismo tema con enfoque técnico distinto. El método de prueba se puede utilizar para probar resinas o laminados, sin funcionar como aislamiento eléctrico.

Kg/cm <sup>2</sup>	Plastic lumber yard	Plastimadera	Polímero virgen	Esperados (ROM)
<b>Resistencia a la Tensión</b>	100	138.13	224.33	237.83
<b>Módulo</b>	3585	3966.82	10808.82	7926.77

Tabla 10. Valores de PEAD reciclado, polímero virgen y resultados esperados, propiedades de tensión.

Se determina que las muestras de ensayo, deben cumplir con las dimensiones de la *imagen 14*.

En el caso de la preparación se incluyó el moldeo por inyección, las operaciones de mecanizado, troquelado, y el corte de las piezas. Todas las superficies de la muestra estuvieron libres de visibles defectos, rayones o imperfecciones.

Se tomó en cuenta que, al probar materiales sospechosos de anisotropía, se deben preparar conjuntos duplicados de probetas, con sus ejes largos respectivamente paralelos y normales a la sospecha de dirección de anisotropía<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> Es la propiedad general de la materia según la cual cualidades como elasticidad, temperatura, conductividad, velocidad de

Se realizaron las pruebas para 5 especímenes, según lo descrito por la norma. Se realizaron las pruebas a una velocidad de 5 mm/mim, hasta encontrar la falla del material, que es su esfuerzo máximo. Se produjo una fractura al centro de las probetas. El comportamiento del material fue uniforme, así como el comportamiento a la ruptura.

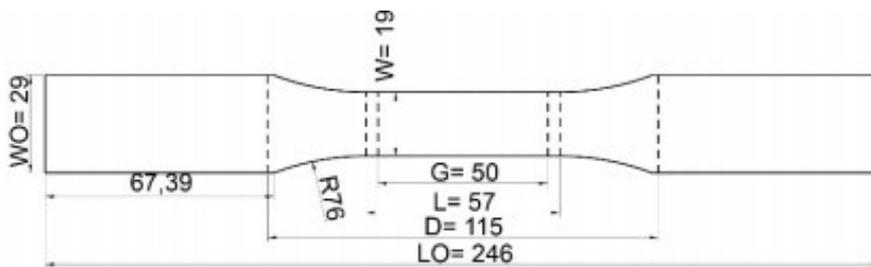
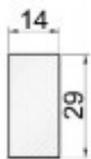


Figura 28. Medida seleccionada de la norma ASTM D638-14.



**Nota:**

Medidas en milímetros.

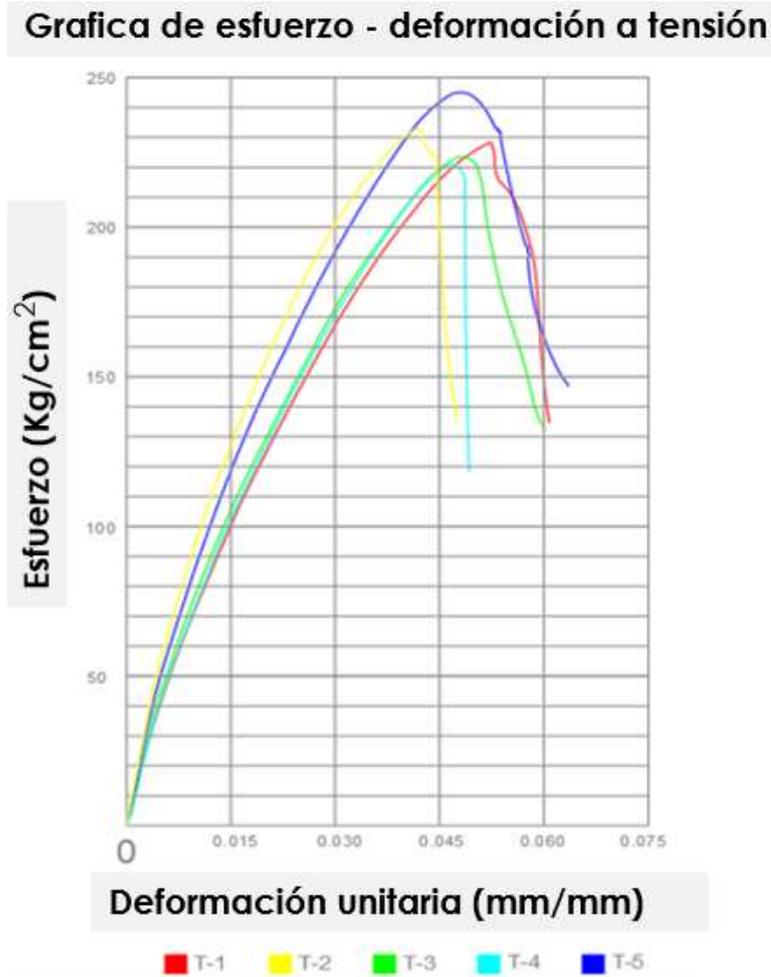
**Fuente:** Norma ASTM D638-14

Los especímenes de prueba se acondicionaron a  $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$ , no menos de 40 horas previas al ensayo.

De igual forma que en las probetas utilizadas para las pruebas de compresión, se realizó la medición de cada una.

---

propagación de la luz, etc., varían según la dirección en que son examinadas. Algo anisótropo podrá presentar diferentes características según la dirección. Algunos ejemplos son la madera o la fibra de Carbono.



Gráfica 3. Esfuerzo - deformación pruebas de laboratorio a tensión.

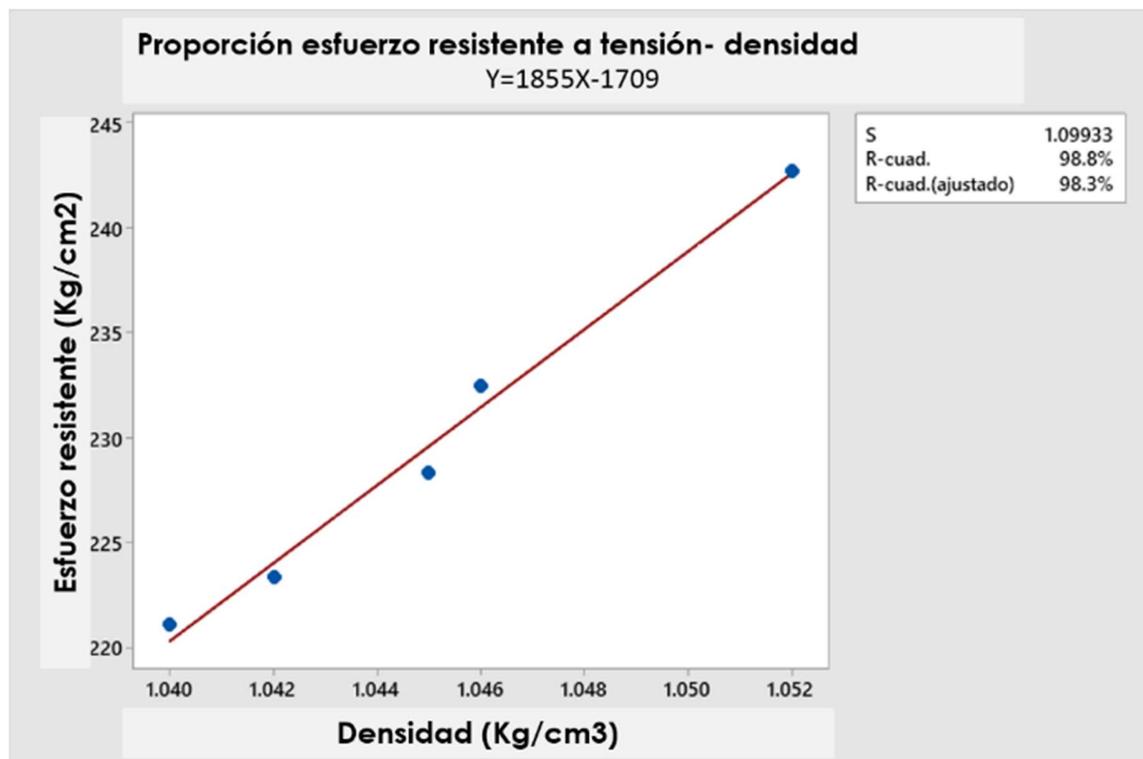
Las gráficas obtenidas a partir de la máquina de pruebas universales muestran regularidad y una falla con una baja desviación estándar.

Esfuerzo máximo de 143.49 Kg/cm<sup>2</sup>, diferente 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 183.69 Kg/cm<sup>2</sup>. Los valores obtenidos son similares a los de la madera plástica.

	Unidad	T-01	T-02	T-03	T-04	T-05	Promedio	Desviación estándar	% desviación
Módulo elástico	Kg/cm <sup>2</sup>	6,009.615	7,614.213	7,614.213	7,614.213	7,614.213	7,293.294	717.598	9.839%
Esfuerzo al límite elástico	Kg/cm <sup>2</sup>	107.110	110.140	110.660	94.530	110.850	106.658	6.946	6.513%
Esfuerzo a una deformación de 3%	Kg/cm <sup>2</sup>	177.24	172.99	191.77	170.50	200.97	182.69	13.12	7.181%
Esfuerzo a ruptura	Kg/cm <sup>2</sup>	228.375	223.385	232.491	221.108	242.721	229.616	8.555	3.726%
Deformación a ruptura	%	3.486	2.765	3.114	3.224	3.193	3.156	0.260	8.224%
Densidad	g/cm <sup>3</sup>	1.040	1.035	1.046	1.032	1.052	1.041	0.008	0.780%

Tabla 11. Base de datos para los valores de propiedades de resistencia a la tensión obtenidos.

Se realizó un análisis estadístico para la base de datos obtenida que representa los resultados de la experimentación.



Gráfica 4. Regresión lineal para valores de densidad - resistencia máxima a la tensión

## Estadísticas

Variable	Media	Error estándar de la media	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

Tabla

12. Datos estadísticos de la regresión lineal entre la densidad y la resistencia a la compresión con una deformación del 3%.

La correlación entre la densidad y los valores de resistencia máxima a la tensión es alta (debido a su cercanía a 1), incluso más que en los obtenidos de las probetas para compresión.

Los valores obtenidos mantienen resultados con una desviación estándar baja, debido a que se han selecciona probetas con una fabricación en parámetros de temperatura y presión similares. Sin embargo, se han detectado defectos en las probetas.



Figura 29. Máquina de pruebas universales utilizada para las pruebas a tensión. LMSE, Facultad de Arquitectura UNAM.

### 3.4.2 Ensayos de relajación de esfuerzos

La prueba de relajación de esfuerzos es necesaria para conocer el comportamiento viscoelástico de un material. Mediante una carga constante se mide la variación del esfuerzo del material al transcurrir el tiempo (Becerril, G.D, 2005). Para conocer y analizar el comportamiento de un material viscoelástico se utilizan diversos modelos matemáticos dentro de los que destaca el modelo de Maxwell, el cual se presenta a continuación:

**Modelo de Maxwell.** Es uno de los modelos básicos de la viscoelasticidad, la cual como se ha visto anteriormente, es una característica mecánica de los polímeros. Estos materiales presentan deformación inmediata ante las cargas y otra que depende de la aplicación de una carga constante en el tiempo. Por lo tanto, en este modelo se considera un comportamiento en serie de un material elástico y viscoso. En la cual se presenta la suma en serie de la deformación elástica y viscosa  $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$  ( $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$  para esfuerzos).

Al considerar la variable del tiempo este modelo se representa bajo la siguiente ecuación:

Ecuación 17

$$\frac{\sigma'}{E} + \frac{\sigma}{\eta} = \varepsilon' = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta} = \frac{d\varepsilon}{dt}$$

Donde:

$\varepsilon$ = deformación

$\sigma$ = esfuerzo

E= módulo de elasticidad

t= tiempo

$\eta$ = constante viscoelástica

En el caso donde la deformación es constante la ecuación se iguala a 0.

Ecuación 18

$$0 = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta}$$

Resolviendo la ecuación y considerando un tiempo igual a 0 como condición inicial se llega a la siguiente solución:

Ecuación 19

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 E e^{-\frac{E}{\eta}t}$$

Se puede observar en la ecuación anterior que el esfuerzo en función del tiempo depende también de las constantes viscoelásticas y la deformación inicial. Como se mencionó anteriormente el módulo de elasticidad fue obtenido de las pruebas de tensión y compresión. Debido a ello el siguiente objetivo fue obtener la constante viscoelástica.

Para realizar lo anterior se consideró hacerlo con una prueba de relajación de esfuerzos en un arreglo de viga empotrada. Dicho experimento será explicado a continuación:

Las 3 probetas utilizadas tienen una medida de 5.0 x 2.0 x 1.5 cm, las cuales fueron instrumentadas con galgas extensométricas para medir la deformación. Como se sabe al utilizar esta técnica de medición se debe limpiar la superficie de la probeta con alcohol isopropílico y posteriormente realizar la unión, mediante adhesivos, entre las láminas de las galgas y la probeta con el fin de que se deformen simultáneamente durante la prueba.

Las galgas extensométricas fueron de la marca Vishay Micro-Measurements EA-06-240LZ-120, las cuales se utilizan para polímeros. Las galgas se encuentran cercanas a la zona de voladizo donde se aplicará la carga. En la figura 30 se muestra una de las probetas instrumentada, mientras que en la figura 31 se observa la probeta colocada en el equipo utilizado para las pruebas un instante antes de aplicar la carga en la probeta.



Figura 30. Preparación de las probetas para la prueba de relajación de esfuerzos.

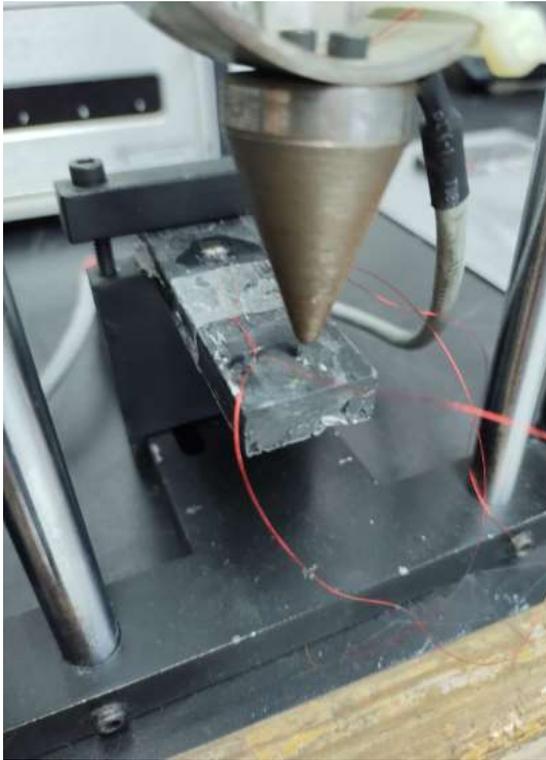


Figura 31. Prueba de relajación de esfuerzos.

Para iniciar cada prueba se mantuvo la posición del aplicador de carga de manera constante sobre la probeta flexionada.

Las lecturas para las deformaciones se tomaron cada hora por un periodo de 3 días. El equipo utilizado permite conocer para cada deformación en la probeta la fuerza aplicada, ambas fueron medidas cada minuto.

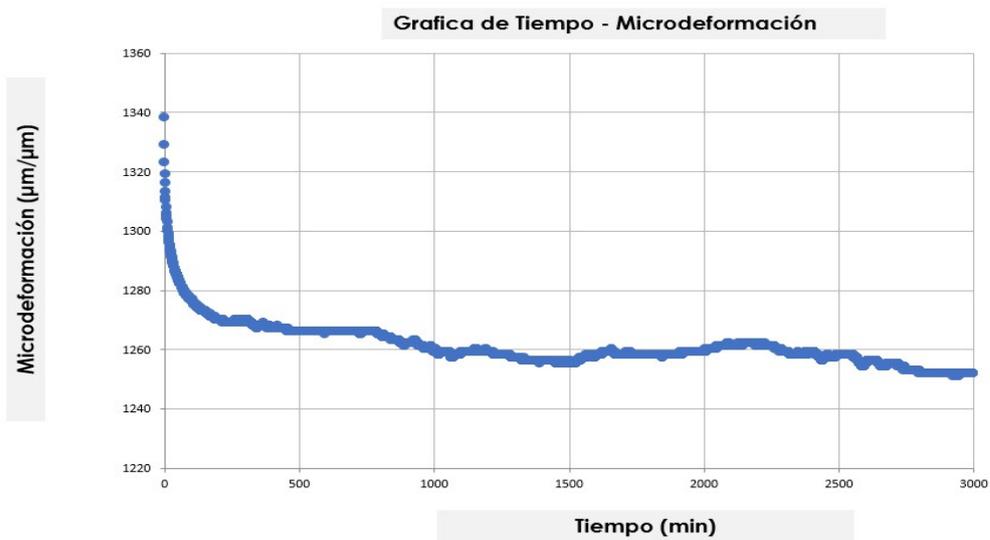
En las gráficas 5, 6, 7, 8, 9 se muestran el comportamiento del material en los casos de fuerza vs tiempo y deformación vs tiempo respectivamente para las 3 pruebas realizadas. En ambas graficas de cada probeta se puede observar claramente el comportamiento viscoelástico del material.

Ecuación 20

$$\sigma = \frac{6F(L-x)}{bh^2}$$

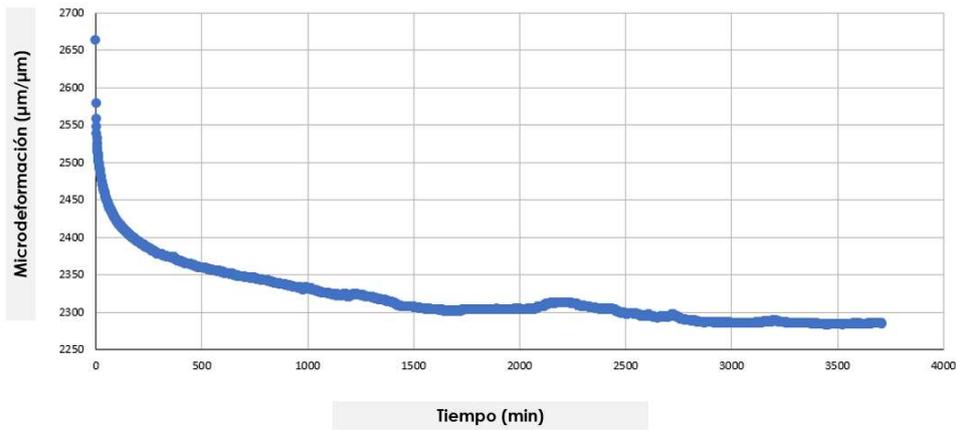


Gráfica 5. Grafica tiempo - micro deformación 01, resultado de la relajación de esfuerzos en el material, prueba 1.

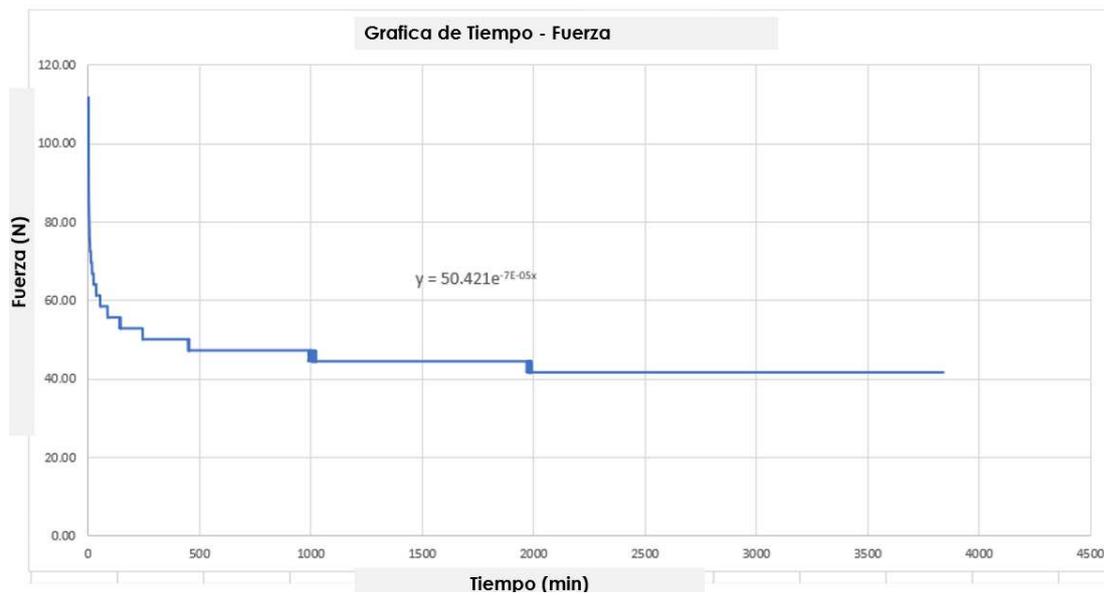


Gráfica 6 Grafica tiempo - micro deformación 02, resultado de la relajación de esfuerzos en el material

Grafica de Tiempo - Microdeformación



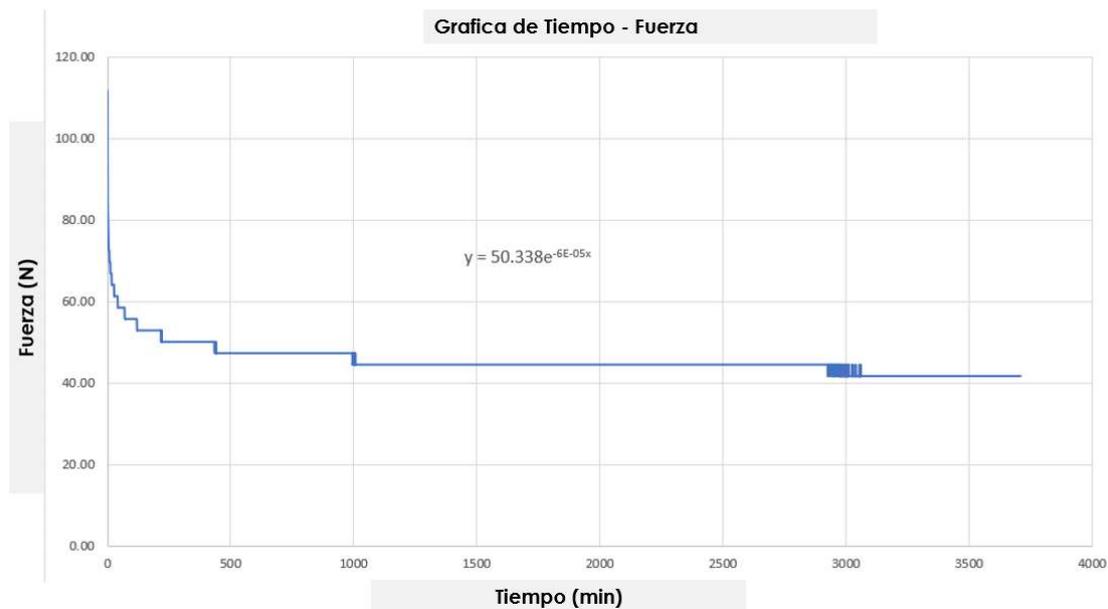
Gráfica 7 Grafica tiempo - micro deformación 03, resultado de la relajación de esfuerzos en el material



Gráfica 8. Gráfica de tiempo - fuerza 01, prueba 2



Gráfica 9. Gráfica de tiempo - fuerza 02



Gráfica 10. Gráfica de tiempo - fuerza 03

Debido a que el modelo de Maxwell está en función del esfuerzo y no de fuerza, fue necesario calcularlo en cada instante del tiempo.

Para realizar lo anterior se utilizó la siguiente ecuación para el caso de flexión:

Ecuación 21 
$$\sigma = \frac{6F(L-x)}{bh^2}$$

Donde:

F= fuerza aplicada (N)

L= Distancia del empotramiento a la carga aplicada (m)

X= distancia del empotramiento al extensómetro (m)

b= ancho (m)

h= espesor (m)

En estas curvas de esfuerzo vs tiempo cuando el tiempo es igual a 0 (cero), el esfuerzo está dado por  $\sigma(0)$ , el cual nos sirve de valor inicial de la ecuación.

Al realizar las líneas de tendencia y su ecuación exponencial para cada una de las gráficas se obtienen las siguientes ecuaciones:

Gráfica 01.  $\sigma = 6E+06e^{-7E-05x}$

Gráfica 02.  $\sigma = 6E+06e^{-2E-05x}$

Gráfica 03.  $\sigma = 6E+06e^{-6E-05x}$

Realizado lo anterior se puede conocer el valor del coeficiente viscoelástico para cada prueba realizada igualando los términos que acompañan al tiempo en cada ecuación calculada con el modelo de Maxwell. Si se despeja  $\eta$ , se obtiene la siguiente ecuación:

Ecuación 22

$$\eta = \frac{E}{t}$$

Por lo cual, el valor de  $\eta$  promedio de las probetas ensayadas es de **16,671.74 GPa\*min.**

Al realizar una comparación con el polietileno de alta densidad sin reciclar, se obtuvo un resultado de  $4.14 \times 10^6$  GPa\*seg, el cual, con una carga de 7 MPa, llega a una deformación del 2% en 735,835 horas (Becerril, G.D, 2005), mientras que el material desarrollado en esta investigación posee  $1 \times 10^6$  GPa\*seg.

Ahora si se considera el esfuerzo constante en el modelo de Maxwell se tiene la siguiente ecuación:

Ecuación 23

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{\eta} t + \frac{\sigma_0}{E}$$

$\sigma_0$  Esfuerzo dado en MPa

$\varepsilon(t)$  Deformación al 3% (0.03)

Despejando el tiempo:

Ecuación 24

$$\frac{(\varepsilon(t) - \frac{\sigma_0}{E})\eta}{\sigma_0} = t$$

Los valores utilizados son los siguientes:

$\varepsilon$  Deformación= 3%

$\sigma_0$  Esfuerzo= 13.06 MPa

E Módulo de elasticidad= 670.0153MPa

$\eta$  Coeficiente viscoelástico= 16671.74 GPa\*min

Finalmente al sustituir los valores obtenidos de la experimentación se obtienen los siguientes resultados:

$\{0.03 - [(13.06\text{MPa}/670.0153\text{MPa}) 16671.74 \text{ GPa*min}]\} / 13.06 \text{ MPa}$

Lo cual da como resultado final 15.31 años.

### 3.4.4 Densidad

#### Método de prueba estándar para densidad aparente y gravedad específica. Basado en la norma ASTM D 6111-03

Materiales e instrumentos para prueba

- bascula de gancho con precisión de  $\pm 20$  g
- termómetro digital con termopares y precisión de 0.1 °C
- Recipiente para albergar agua, con capacidad de 32 l (40 x 20 x 40)
- Plomada con peso de 1.450 Kg
- 5 probetas de 3 x 3 x 9 cm (referencia en figura 5).

Procedimiento:

Se debe mantener el agua a una temperatura de  $23 \pm 2$  °C en el recipiente. Se pesa cada probeta. La plomada se pesará en el agua. Posteriormente se sujetará la probeta a la plomada y se sujetará en la báscula, después la probeta se sumergirá en el agua hasta permanecer cubierta totalmente. Se registrarán los resultados conforme a los puntos en procedimiento de registro realizado en las anteriores pruebas.

Cálculo:

Para obtener el promedio de los grupos pesados se utiliza la siguiente expresión:

$$Sp\ g\ 23/23\ ^\circ C = A / (A + W - B) \quad \text{Ecuación 25}$$

a = peso de la probeta

b = peso de la probeta sumergida en agua con la plomada

w = peso de la plomada sumergida en el agua

Para determinar la densidad prevista se utiliza la siguiente expresión

$$\rho_s = f_{mpf} + f_{rpf} \quad \text{Ecuación 26}$$

$\rho_s$  = densidad prevista del material compuesto

$f_{mpf}$  = densidad prevista promedio de la matriz multiplicada por su porcentaje dentro del compuesto

$f_{rpf}$  = densidad prevista promedio del refuerzo multiplicado por su porcentaje dentro del compuesto

Lo cual da un resultado de 1.055 g/cm<sup>3</sup>, por lo cual este será el resultado esperado para el compuesto.

$$\rho_s = 0.96 \cdot 0.7 + 2.58 \cdot 0.3 = 1.055 \text{ g/cm}^3$$

Para determinar el peso volumétrico de las probetas se utiliza la siguiente expresión:

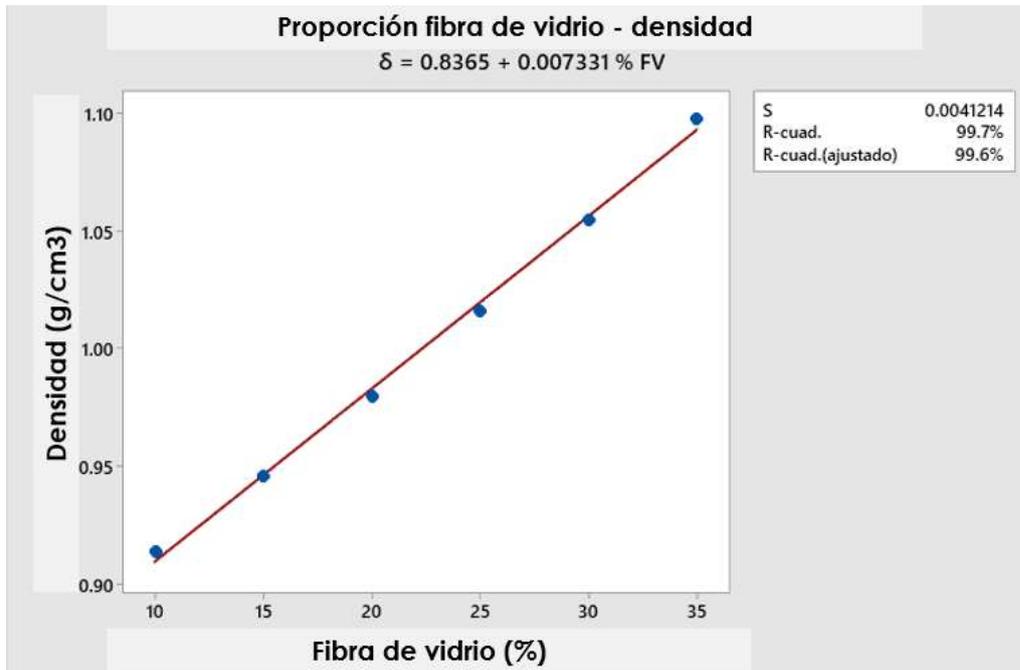
$$\rho_v = \rho_p \text{ g } 23/23 \text{ } ^\circ\text{C} * 0.9976 \quad \text{Ecuación 27}$$

El peso volumétrico del material compuesto será diferente al de la matriz, lo anterior debido a la interacción de las densidades de ambos materiales, por lo cual resulta más denso que el PEAD reciclado o virgen.

En el caso de las pruebas para determinar la densidad también se aplicó un método de análisis e interpretación de datos estadísticos.

Muestra	Porcentaje (%)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
1	10.000	0.914
2	15.000	0.946
3	20.000	0.980
4	25.000	1.016
5	30.000	1.055
6	35.000	1.098
Media	22.500	1.002

Tabla 13. Datos para los porcentajes de fibra de vidrio y densidad, en el material compuesto.



Gráfica 11.

Regresión lineal entre densidad y fracción volumétrica de fibra de vidrio.

**Nota:**

Se muestra la correlación entre la fracción volumétrica de la fibra de vidrio (porcentaje dentro del compuesto y la densidad obtenida)

**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.4.5 Análisis termogravimétrico TGA

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.

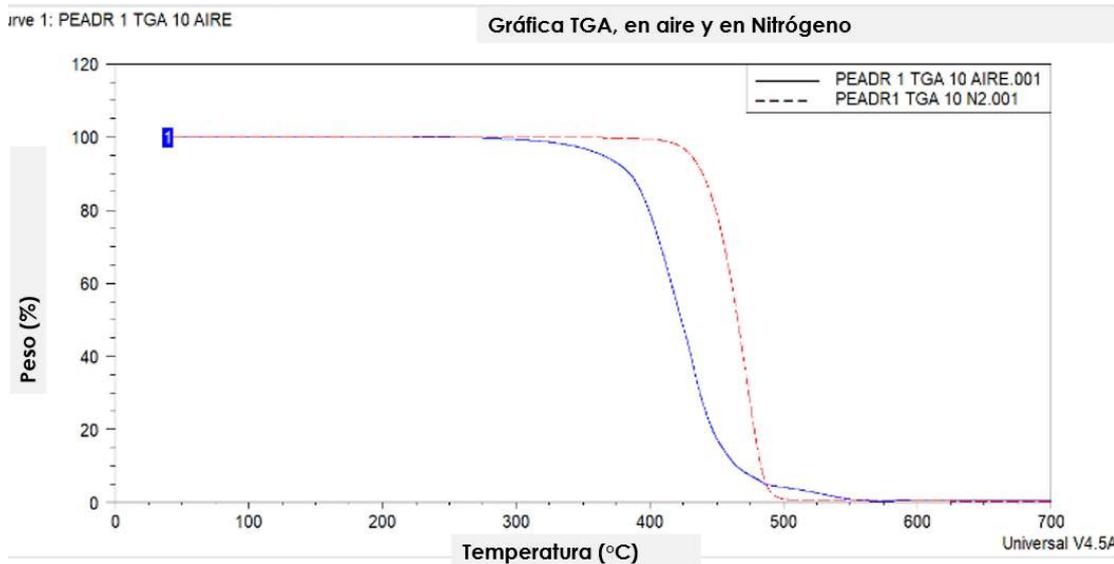
El polímero se calentó desde la temperatura ambiente hasta los 700 °C. A los 260 °C, se comienza a observar la pérdida de masa, con un 99.98 %, respecto al original. La pérdida de masa aproximada al 5%, se observa a los 365 °C, con 94.98 % de masa, respecto a la original. Mientras que a las 375 °C se 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 12. Análisis termogravimétrico TGA, realizado a polietileno de alta densidad reciclado, utilizado en las probetas.

PEADR1 TGA 10. Se refiere al análisis termogravimétrico realizado al PEAD reciclado, el cual se realizó en una atmósfera de aire (AIRE.001). N2 001, se refiere a la realización del mismo análisis en una atmósfera de Nitrógeno, donde la descomposición es más lenta.

Fuente: Análisis realizados en el IIM, de la UNAM.



Figura 32. Máquina de análisis termogravimétrico. Instituto de Investigaciones en Materiales de UNAM.

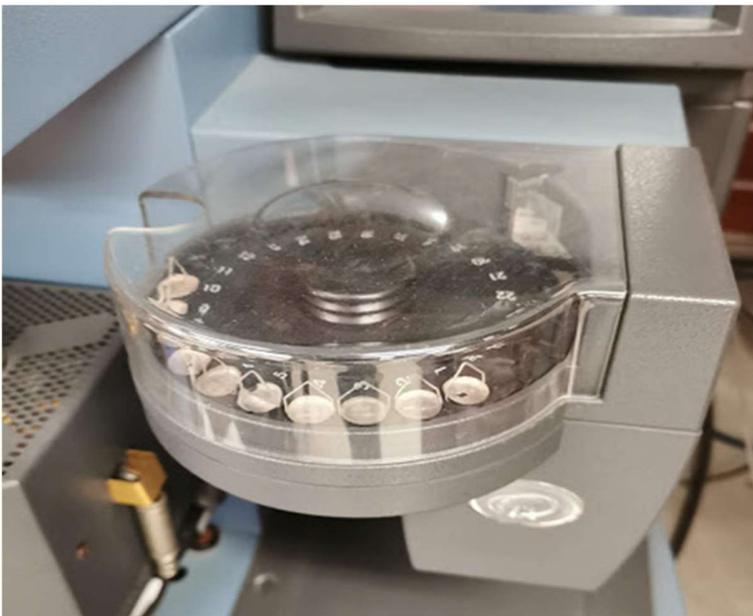


Figura 33. Colocación de muestra de PEAD reciclado en la charola para el posterior análisis térmico.

Al realizar ambos análisis se pudo concluir que en una atmósfera oxidativa como la del aire, la descomposición del PEAD reciclado se presenta antes que en la del Nitrógeno. Debido a las temperaturas en relación a la pérdida de masa, se determinó que la temperatura límite para el análisis de escaneo diferencial de barrido, se realizará hasta los 300 °C, con lo cual se evita la descomposición del polímero.

La recta que se genera en ambas gráficas es con una ligera pendiente y uniforme, por lo cual, se muestra que el polímero estudiado, tiene estabilidad térmica ideal para su producción, así como similitud con el polímero virgen. Por lo tanto, se concluye que a pesar de que el polímero estudiado es reciclado, no se presenta una variación considerable, respecto a las propiedades térmicas del polímero virgen, según lo estudiado por el tipo de análisis realizado.

### 3.4.6 Calorimetría 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  $T_f$ , así como la de cristalización  $T_c$ .

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.

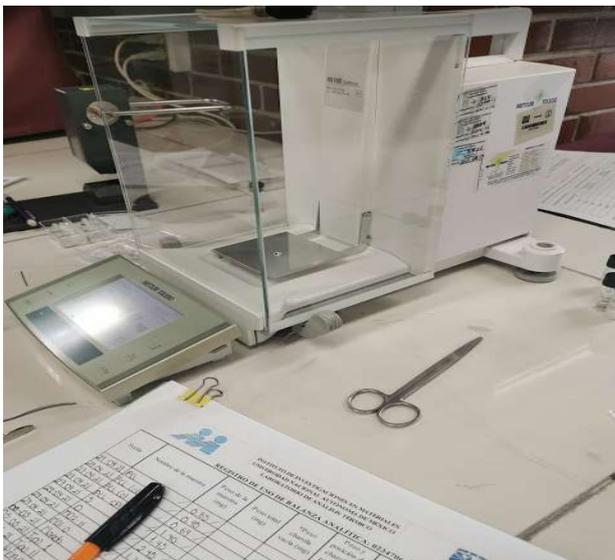
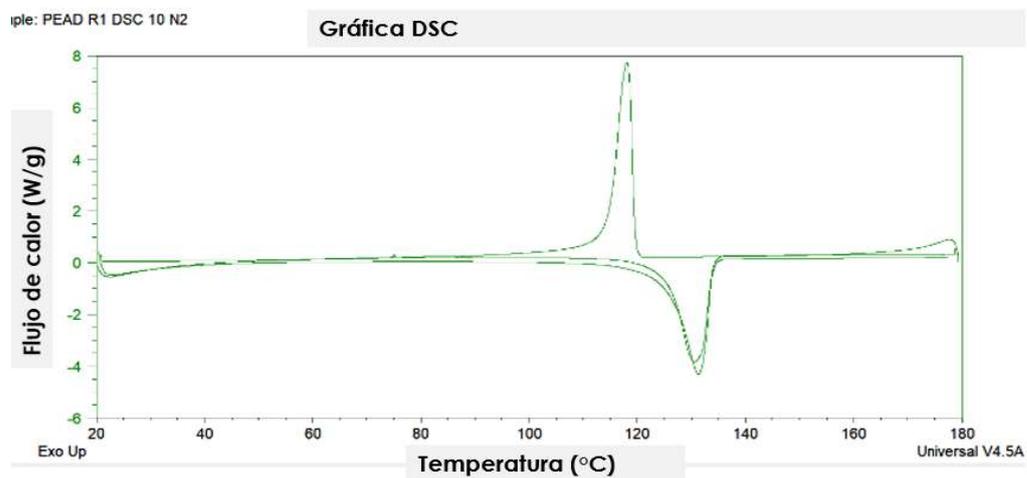


Figura 34. Pesaje de la muestra de PEAD reciclado en báscula, para introducir dato en la máquina para análisis DSC.



cm

Figura 35. Realización de prueba de escaneo diferencia de barrido. Instituto de Investigaciones en Materiales de UNAM.



Gráfica 13. Resultados del análisis DSC, en cual se observa el punto más bajo de la gráfica, la temperatura de fusión y el más alto de la gráfica, donde se encuentra la temperatura de cristalización.

**Nota:**

PEADR1 DSC 10 N2 Se refiere al análisis de escaneo diferencial de barrido realizado al PEAD reciclado, el cual se realizó en una atmósfera de Nitrógeno. En este caso, la única atmósfera utilizada.

**Fuente:** Análisis realizados en el IIM, de la UNAM.

**Poliétileno de alta densidad reciclado reforzado por fibra de vidrio.**

**Aplicación estructural en la arquitectura.**

## 4 PROYECTO DE APLICACIÓN

Una vez obtenidos los resultados de las pruebas de laboratorio, estos fueron introducidos en un modelo de análisis estructural, mediante el programa SAP2000. La geometría del espacio arquitectónico fue modelada, además de la introducción de las cargas fueron tomados en cuenta los efectos del viento y el sismo, debido a que son cargas accidentales que se presentan en las estructuras de edificaciones de la Ciudad de México. La temperatura y el tiempo de servicio también fue analizado, para obtener las dimensiones de los perfiles del material propuesto. Finalmente, se realizó una comparativa económica frente a otros materiales con los que se podría fabricar una armadura para cubierta ligera.

### 4.1 Definición de las condiciones del medio

#### 4.1.1 Temperatura y clima

Los datos presentados en el servicio meteorológico de la Ciudad de México muestran los parámetros de clima a considerar para la aplicación del material. La temperatura máxima corresponde a la registrada el 9 de mayo de 1998, la cual fue de 33.9 °C. La anterior temperatura será la utilizada para el factor de reducción por temperatura  $C_t$ .

De acuerdo con datos del INEGI, en la Ciudad de México predomina el clima templado subhúmedo con el 87 % de la extensión. La temperatura máxima promedio del año 2021, no ha superado los 30 °C, la cual se presenta entre los meses de marzo, abril y mayo. Se tomará la información obtenida de investigaciones previas (Carroll et al., 2001) (Slaughter, 2004) (Salcedo Cortés et al., 2015; Slaughter, 2004). En dichas investigaciones se determina el esfuerzo resistente a diferentes temperaturas. A partir de los datos obtenidos y la experimentación a temperatura ambiente, se determina el factor. La norma ASTM D7568-17, establece la realización de pruebas a temperatura baja, de  $-10 \pm 2$  °C; a temperatura alta  $50 \pm 2$  °C; y a temperatura de control  $23 \pm 2$  °C. El factor de reducción se calculará mediante la siguiente expresión:

$$C_t = F / F_{ctl} \quad \text{Ecuación 28}$$

Donde:

$C_t$ : factor de reducción por temperatura

F: esfuerzo para cada temperatura

$F_{ctl}$ : esfuerzo a la temperatura de control  $23 \pm 2$  °C

A través de los valores obtenidos se obtiene la ecuación que describe el comportamiento a diferentes temperaturas. Así mismo, se realiza la gráfica, donde se encuentra el valor de reducción para 30 °C, el cual es 0.70.

El comportamiento mecánico del material desciende de forma exponencial conforme aumenta la temperatura, por lo cual una temperatura más baja a la de control, puede ayudar a mantener las propiedades observadas de forma experimental.

### 4.1.2 Viento

Se realizará la definición de los efectos del viento, con fundamento en el capítulo 3 de las Normas Técnicas Complementarias de diseño por viento.

En reglamentos y manuales de diseño eólico se establece una corrección de la velocidad regional para calcular la velocidad de diseño por viento:

$$VD = FTR \cdot Fa \cdot VR \quad \text{Ecuación 29}$$

donde:

$F_{TR}$ : factor correctivo que toma en cuenta las condiciones locales relativas a la topografía y a la rugosidad del terreno en

los alrededores del sitio de desplante

$F_a$ : factor que toma en cuenta la variación de la velocidad con la altura

$V_r$ : velocidad regional según la zona que le corresponde al sitio en donde se construirá la estructura.

**La velocidad regional** se determina según la zona que le corresponde al sitio en donde se construirá la estructura, en este caso  **$V_R$ : 30 m/s.**

Periodo de retorno, años	Importancia de la construcción		
	A	B	Temporal
	200	50	10
Zona I: Delegaciones de <i>Azcapotzalco</i> , y <i>G. A. Madero</i>	28	25	19
Zona II: Delegaciones de <i>Miguel Hidalgo</i> , <i>Cuauhtémoc</i> , <i>Venustiano Carranza</i> , <i>Benito Juárez</i> , <i>Coyoacán</i> , <i>Iztacalco</i> , e <i>Iztapalapa</i>	33	30	23
Zona III: Delegaciones de <i>Cuajimalpa</i> , <i>Álvaro Obregón</i> , <i>Magdalena Contreras</i> , <i>Tlalpan</i> , <i>Milpa Alta</i> , <i>Tláhuac</i> , y <i>Xochimilco</i>	39	35	27

Figura 36. Velocidades regionales en la Ciudad de México, según la importancia de la construcción.

**Nota:**

En las diferentes alcaldías de la Ciudad de México se presentan distintas velocidades de viento en m/s.

**Fuente:** Normas Técnicas Complementarias Diseño por Viento 2017.

**F<sub>α</sub>: 1.0**, ya que el análisis y altura de la estructura es menor a los 10 m.

$$\begin{aligned}
 F_{\alpha} &= 1.0; & \text{si } z \leq 10 \text{ m} \\
 F_{\alpha} &= (z/10)^{\alpha}; & \text{si } 10 \text{ m} < z < \delta \\
 F_{\alpha} &= (\delta/10)^{\alpha}; & \text{si } z \geq \delta
 \end{aligned}$$

**F<sub>TR</sub>: 0.79**. Se trata de una zona típica urbana y suburbana. El sitio está rodeado predominantemente por construcciones de mediana y baja altura o por áreas arboladas. Debido a la localización geográfica, se determina que el sitio tomado en cuenta para el proyecto de aplicación cumple con las características T2, valles cerrados. El tipo de

	Tipos de topografía	Rugosidad de terrenos en alrededores		
		Terreno tipo R2	Terreno tipo R3	Terreno tipo R4
T1	Base protegida de promontorios y faldas de serranías del lado de sotavento	0.80	0.70	0.66
T2	Valles cerrados	0.90	0.79	0.74
T3	Terreno prácticamente plano, campo abierto, ausencia de cambios topográficos importantes, con pendientes menores de 5 % (normal)	1.00	0.88	0.82
T4	Terrenos inclinados con pendientes entre 5 y 10 %	1.10	0.97	0.90
T5	Cimas de promontorios, colinas o montañas, terrenos con pendientes mayores de 10 %, cañadas o valles cerrados	1.20	1.06	0.98

Figura 37. Factor correctivo por topografía y rugosidad.

**Nota:**

El factor correctivo, toma en cuenta la rugosidad del terreno según las obstrucciones que pueda haber, así como las formas topográficas locales.

**Fuente:** Normas Técnicas Complementarias Diseño por Viento 2017.

Al aplicar los anteriores valores a la ecuación para conocer la velocidad de diseño, se tiene el siguiente resultado:

**V<sub>D</sub>: (30 m/s)(1.0)(0.79) = 23.7 m/s.**

Lo mencionado por las NTC de Diseño por Viento y el manual de diseño de obras civiles, diseño por viento cfe (CFE, 2008), es similar, así como los valores, donde las isotacas para un periodo de retorno de 50 años se determina una velocidad de 110 Km/hr (30.55 m/s).

**Presión de diseño.** Al obtener los valores de la presión de diseño, se podrá conocer la carga a asignar sobre la edificación en su eje x y su eje y

$P_z = (0.048)(C_p)(V_D^2)$ . *Ecuación 30*

Donde:

$V_D^2$ : velocidad de diseño al cuadrado (561.69).

$C_p$ : coeficiente local de presión

Tipo de cubierta	r = a/d	Zona		
		A	B	C
En estructura elevada	0 < r < 0.2	-0.9	-0.7 - r	-0.5
	0.2 ≤ r ≤ 0.3	(1.5r-0.3)*	-0.7 - r	-0.5
	0.3 < r ≤ 0.6	2.75r-0.68	-0.7 - r	-0.5
Apoyada en el terreno	0 < r ≤ 0.6	1.42r	-0.7-r	-0.5

Figura 38. Coeficientes de presión, para cubiertas en arco.

**Nota:**

El coeficiente de presión, necesario para conocer los efectos del viento en una estructura, se obtiene conforme a la anterior tabla.

**Fuente:** Normas Técnicas Complementarias Diseño por Viento 2017.

La estructura se encuentra apoyada en el terreno, el arco más elevado cuenta con 8.00 m, por lo cual  $r = 0.533$  en el eje x, mientras que el eje y,  $r = 0.266$ . Al encontrarse en el Valle de México el coeficiente de presión es igual a  **$C_p = -0.5$**

Por lo cual la presión de diseño es  **$P_z = 13.48 \text{ Kg/m}^2$**

Para la aplicación dentro del modelo estructural, se dividirá la presión de diseño entre los nodos que reciben dicha presión.

### 4.1.3 Sismo

Las acciones accidentales como sismo a diferencia de las cargas vivas y las muertas, no pueden ser estudiadas como una acción permanente o semipermanente, debido a la aleatoriedad del fenómeno natural y la incapacidad de su pronóstico o predicción. Estos efectos se encuentran en función de la relación de la estructura entre su masa y su elevación a partir del suelo; así como las aceleraciones del terreno y la capacidad de la estructura para disipar la energía.

Los sismos pueden causar movimiento directo de las estructuras debido al desplazamiento de la estructura respecto a la conexión con el suelo. Los dos efectos principales de este movimiento son un efecto desestabilizante general a causa de la sacudida y la fuerza ocasionada por la masa de la edificación (González Flores, 2009).

El efecto de la fuerza provocado por el movimiento es directamente proporcional al peso muerto de la estructura, lo cual determina parcialmente la respuesta dinámica de la estructura. Otros factores trascendentales son el periodo fundamental de vibración y la eficiencia de absorción de energía.

En el caso del periodo de vibración, está determinado por la masa, rigidez y tamaño de la estructura. La eficiencia de absorción de energía está determinada por la elasticidad de la estructura, rigidez de los apoyos y conexiones (González Flores, 2009).

Los periodos fundamentales de las estructuras se encuentran entre 0.005 para equipos y máquinas ancladas al piso, 0.1 para un marco estructural, 0.5 para una edificación de 4 pisos, entre 1 y 2 segundos para un edificio de 10 a 20 niveles (González Flores, 2009).

Una gráfica de respuesta espectral muestra la representación estadística de datos sobre reproducciones de sismos en estructuras con diferentes periodos. En la siguiente imagen se muestra la respuesta máxima expresada en términos de desplazamiento, velocidad o aceleraciones) que produce una acción dinámica determinada en varios osciladores de 1Gal. En el eje X se encuentra el periodo (o la frecuencia) de vibrar propio de la estructura y en las ordenadas (Y) la respuesta máxima calculada para cada periodo T del oscilador, con el mismo factor de amortiguamiento. Un ejemplo en la aplicación de la gráfica espectral es el tener varios péndulos fijados a una base, al aplicar un movimiento sísmico, los péndulos se moverán y se podrá registrar la respuesta máxima de cada péndulo, es decir el tiempo y la frecuencia particular de cada uno al resonar con vibración de máxima amplitud. Las respuestas, se grafican en función de los periodos, se obtendrá una gráfica con línea curva o espectro de respuesta la cual relaciona el movimiento del suelo con un intervalo de periodos naturales (González Flores, 2009). Respecto a la influencia del suelo en los efectos sísmicos, se debe recurrir a los acelerogramas, los cuales varían dentro de valores relativamente ancha, sin embargo, en tipos de suelo y condiciones específicas, puede existir un periodo dominante, como es el caso del espectro de Fourier, en un acelerograma de zona blanda, se observa un periodo definido de  $T = 2$  s, lo cual, conduce a un problema dinámico conocido como resonancia, que consiste en una ampliación excesiva de la respuesta de aquellas estructuras que tienen un periodo de oscilación muy parecido al de la excitación, lo cual puede llevar al colapso total, sobre todo cuando el evento sísmico es grande

Al diseñar una estructura para resistir sismos, se debe considerar la resistencia, rigidez y ductilidad.

La respuesta sísmica de los edificios se encuentra en base a su flexibilidad y dimensiones. Por ejemplo, un edificio alto y flexible tendrá una deformación considerable, mayor a  $T > 1$  s, mientras que uno rígido con prácticamente ninguna deformación y de dimensiones pequeñas, tendrá una respuesta  $T \geq 0$  (James, 2005).

#### 4.1.4 Tiempo de vida útil de la estructura

Para el análisis de la estructura se utilizará un periodo de 10 años en uso. Los resultados de las pruebas para relajación de esfuerzos permiten fijar que un tiempo de vida útil de 10 años es posible con una deformación del 3% y con el material sometido a esfuerzos constantes.

#### 4.2 Diseño arquitectónico y geometría estructural

Se eligió una estructura a base de armaduras las cuales son elementos compuesto por cuerda superior, inferior, montantes, diagonales, nudos y apoyos. Su función es transmitir las cargas a los apoyos, de forma similar a las vigas, por lo que también son conocidas como vigas de alma abierta. La diferencia es que debido a su geometría, descomponen la flexión en fuerzas más sencillas como la compresión y la tensión. Esto, resulta en elementos más esbeltos y económicos que las vigas tradicionales (Santa Ana Lozada, P.R, 2018).

Su unidad básica es el triángulo. Las cuerdas transmiten las fuerzas, los diagonales descomponen la flexión en tensión y compresión, según su orientación. Los montantes acortan la distancia entre nudos y logran conexión de elementos de la armadura. Los nudos son las intersecciones donde se articulan los elementos anteriormente mencionados.

Las armaduras se dividen en planas cuando forman geometrías trianguladas. También existen las espaciales, cuando se forman en una región 3D y forman tetraedros multiconectados (Santa Ana Lozada, P.R, 2018).

Se ha realizado un proyecto, para aplicar los resultados obtenidos de la experimentación, aplicados a la estructura de una cubierta. El proyecto realizado es para espacios amplios sin interrupción en su planta. A través de una consecución de arcos se forma la estructura principal con la forma de una cúpula de doble manto. Las armaduras son unidas mediante largueros y venteos para proporcionar una mayor rigidez. La cubierta es anclada mediante montenes (también llamados polines metálicos). El claro propuesto para la armadura es de 15 metros, con una altura máxima de 8 metros.

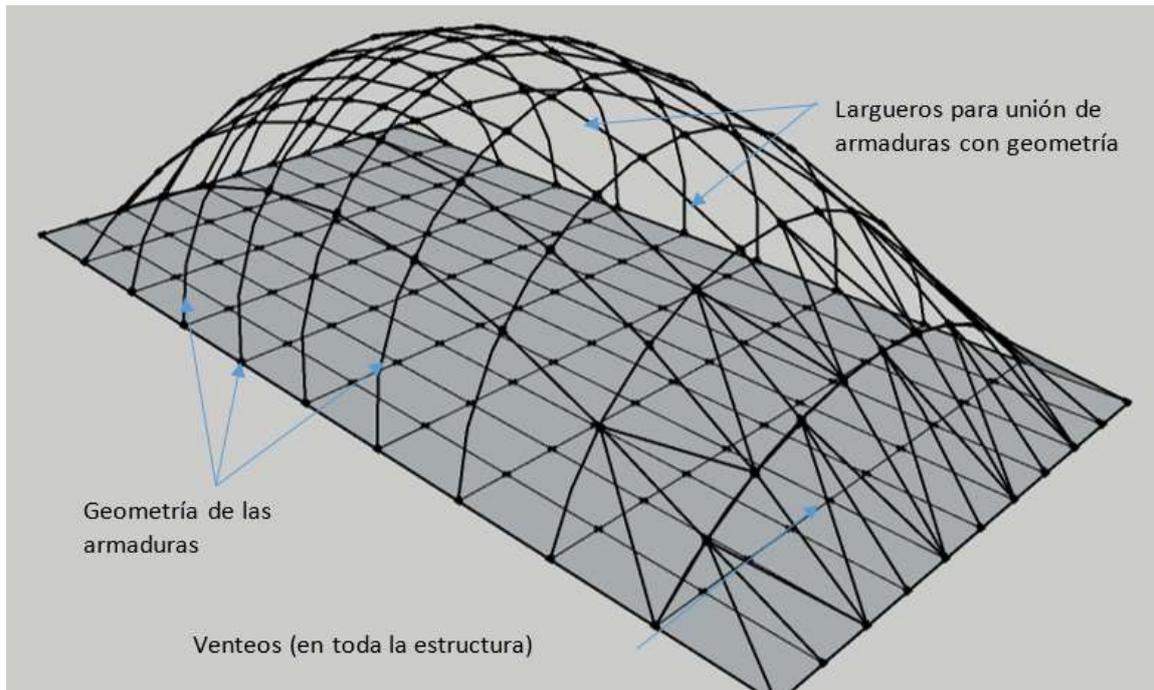


Figura 39. Concepto estructural para el proyecto de aplicación.

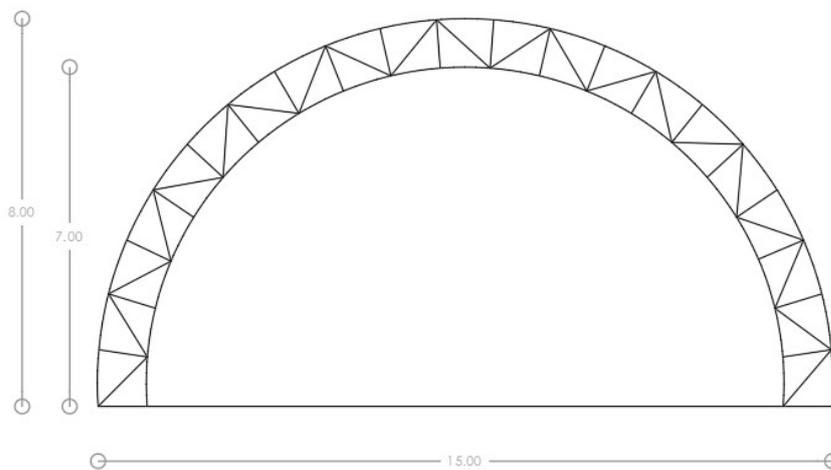


Figura 40. Diagrama de cuerpo libre. Proyecto de cubierta

**Nota:**

Se plantea la formación de una cúpula con variación en las alturas de los arcos que a su vez se forman de piezas de PEAD reciclado reforzado por fibra de vidrio en forma rectangular.

**Fuente:** Elaboración propia.

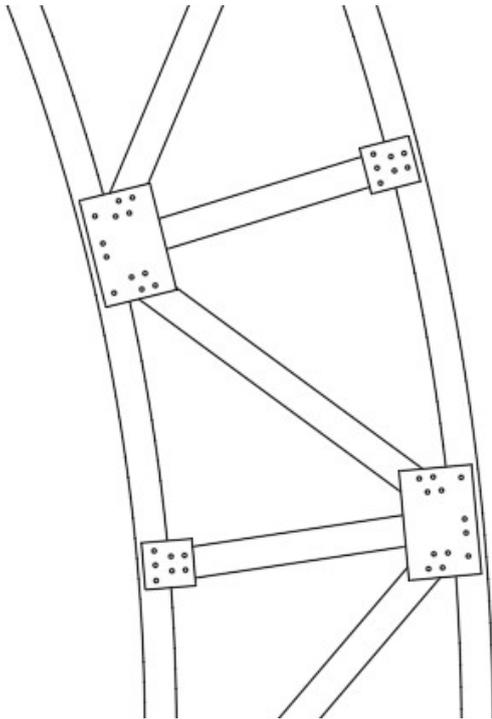


Figura 42. Conexiones entre vigas.

## 4.3 Análisis estructural

### 4.3.1 Análisis de cargas

Se considerarán las acciones de carga definidas por el reglamento de construcciones de la Ciudad de México, las acciones permanentes, las cargas variables y las accidentales.

**Las acciones permanentes** son las que se mantienen de forma continua en la edificación y varían poco con el tiempo. Las principales acciones pertenecientes a esta categoría son la carga muerta que son los pesos de todos los elementos constructivos, de los acabados y de todos los elementos que ocupan una posición permanente y tienen un peso que no cambia sustancialmente con el tiempo; el empuje estático de suelo y de líquidos; así como las deformaciones y desplazamientos producidos a la estructura que varía poco con el tiempo como los debidos a presfuerzo o a movimientos diferenciales de los apoyos(Lozada & R, 2018).

**Las cargas variables** son aquellas que actúan sobre las estructuras de una forma que varía significativamente con el tiempo. En esta categoría se encuentra principalmente las cargas vivas que producen por el uso y

ocupación de la edificación, las cuales no tienen carácter permanente. Se dividen en las siguientes:

$W_m$  carga viva máxima. Es utilizada para diseño estructural, por fuerzas gravitacionales y para calcular asentamientos inmediatos en suelos, así como para el diseño estructural de los cimientos ante cargas gravitacionales.

$W_a$  carga instantánea. Se usa para diseño sísmico y viento. Cuando se revisen distribuciones de carga más desfavorables que la uniformemente repartida sobre toda el área.

$W$  carga media. Se usa para cálculo de asentamientos diferidos y para el cálculo de flechas diferidas.

Vibraciones: se determinarán por la dinámica estructural. Pero no serán mayores que las dispuestas en la tabla 6.1 de las normas técnicas complementarias sobre criterios y acciones para el diseño estructural de las edificaciones.

**Las cargas accidentales** son aquellas que no pertenecen al funcionamiento cotidiano de las edificaciones, pueden alcanzar intensidades significativas durante periodos breves y por lo regular son causadas por fenómenos naturales. Entre estas cargas, se encuentran las acciones sísmicas, los efectos del viento, carga por granizo, explosiones, incendios, y demás fenómenos.

Para el análisis de la estructura se tomaron en cuenta investigaciones realizadas sobre madera plástica o material compuestos a partir de polímeros reciclados, aplicados en superestructura, se utilizan normas para diseño estructural con madera. Sin embargo, dichas normas son adaptadas a las características y cambios que se originan al utilizar los materiales compuestos de matriz polimérica reciclada. Por ejemplo, en la tesis "*Design and fatigue of a structural Wood-plastic composite*" de Andrew Edward Slaughter (Slaughter, 2004) se propone el uso de la norma estadounidense National Design Specification for Wood Construction (NDS).

Para fines de diseño, el tramo se calculará de acuerdo con AASHTO 38 (2002), que establece que el tramo consiste en el tramo libre más la mitad del ancho de un larguero, pero sin exceder el tramo libre más la profundidad del miembro.

La aplicación del ángulo de la plataforma, así como los requisitos de AASTHO para el tramo, da como resultado lapso de diseño (L) dado por la ecuación. (3.12). Usando la ecuación. (3.12) para determinar un tramo del sólido. La sección de la tabla de la plataforma da como resultado un tramo de diseño de 6.2 pulgadas. Luego, la Tabla 3.6 demuestra que la sección de la plataforma es capaz de resistir una carga HS10-44 con una carga de 10

años de factor de duración, que se considera una duración apropiada para la aplicación a una estructura peatonal (Collins y Fischetti, 1996).

Lo anterior explicado, lleva a las conclusiones que, en el diseño estructural para polímeros, además de las variables típicas como las cargas vivas, muertas y accidentales, se debe atender la temperatura a la cual se encontrará expuesta la estructura, los cuales fueron descritos en el anterior subcapítulo.

Una vez obtenidos los datos de las pruebas de laboratorio, serán introducidos en un programa estadístico. Concluido el análisis e interpretación de datos estadísticos, se comenzará con el diseño estructural, bajo las cargas establecidas por el Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México según el uso previsto. A continuación, se expresan las cargas a considerar.

Tabla 14. Cargas utilizadas para el proyecto

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

Se considerarán el peso propio de la estructura, la carga muerta (perteneciente a la cubierta, instalaciones, y plafón). En el caso de las cargas vivas unitarias se utilizarán las descritas en la tabla 6, de las Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones. El destino de la estructura es azoteas con pendiente mayor de 5 %; otras cubiertas, cualquier pendiente (inciso i), por lo tanto, el valor de W (carga media) será de 5 Kg/m<sup>2</sup>, el de Wa (carga instantánea para sismo y viento) será de 20 Kg/m<sup>2</sup>, Wm (carga viva máxima) será de 40 Kg/m<sup>2</sup>. Con la anterior información se puede definir las cargas de servicio, a través de la suma entre la carga muerta y los 3 tipos de cargas.

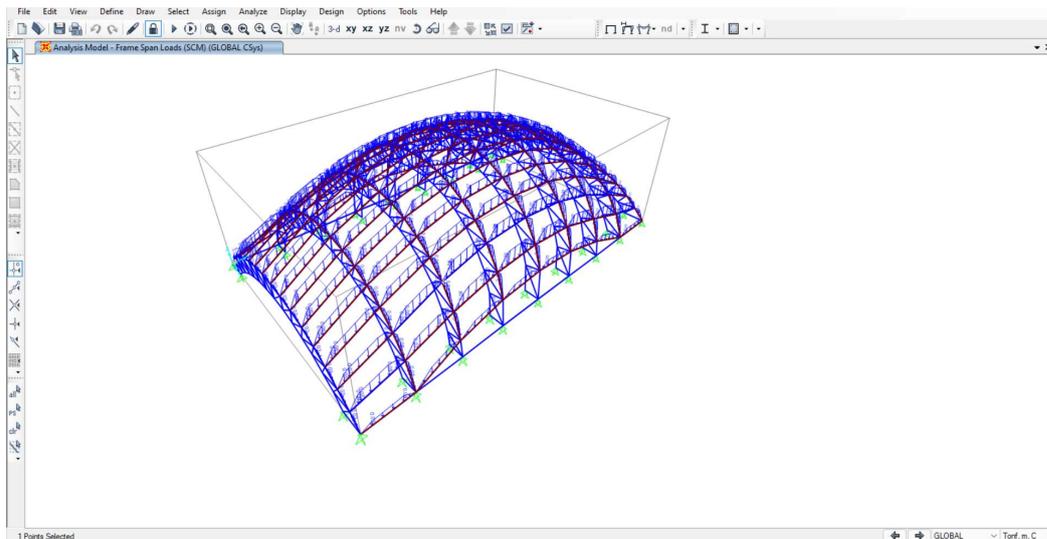


Figura 43. Modelo 3d en SAP2000.

Area Loads - Uniform To Frame

File View Edit Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted Area Loads - Uniform To Frame

Filter:

	Area Text	LoadPat Text	CoordSys Text	Dir Text	UnifLoad Tonf/m2	DistType Text
▶	1	SCM	GLOBAL	Gravity	0.059	Two way
	1	CV ins	GLOBAL	Gravity	0.02	Two way
	1	CV max	GLOBAL	Gravity	0.04	Two way
	2	SCM	GLOBAL	Gravity	0.059	Two way
	2	CV ins	GLOBAL	Gravity	0.02	Two way
	2	CV max	GLOBAL	Gravity	0.04	Two way
	3	SCM	GLOBAL	Gravity	0.059	Two way
	3	CV ins	GLOBAL	Gravity	0.02	Two way
	3	CV max	GLOBAL	Gravity	0.04	Two way
	4	SCM	GLOBAL	Gravity	0.059	Two way
	4	CV ins	GLOBAL	Gravity	0.02	Two way
	4	CV max	GLOBAL	Gravity	0.04	Two way
	5	SCM	GLOBAL	Gravity	0.059	Two way
	5	CV ins	GLOBAL	Gravity	0.02	Two way
	5	CV max	GLOBAL	Gravity	0.04	Two way
	6	SCM	GLOBAL	Gravity	0.059	Two way

Record: << < 1 > >> of 378

Add Tables... Done

Figura 44. Asignación de cargas.

**Nota:**

Las cargas asignadas son resultados del análisis y combinaciones de carga según las Normas Técnicas complementarias del Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México

Dentro de la herramienta digital, se han modelado las vigas (beam), con la nomenclatura V-01, mientras que la lámina de la cubierta como placa (Shell). La asignación de carga se ha realizado de hacia las vigas con una carga uniformemente repartida, según lo dispuesto por el análisis de cargas, expresado en la anterior tabla.

AL realizar la asignación de las cargas, se han obtenido los siguientes resultados dentro del modelo:

Tabla 15. Pesos calculados en la estructura.

Caso de carga	Peso en modelo (Tn)
Peso propio	42.0429
Carga muerta	27.9036
Carga viva máxima	19.5886
Carga viva accidental	9.7943
Carga viva media	2.44857

### COMBINACIONES DE CARGA

Se han considerado las siguientes condiciones de carga:

PP (DEAD) = Peso propio

CM (SCM) = Carga muerta

CVmax = Carga viva máxima

CVins= Carga viva instantánea

CVmed= Carga viva media

S= Carga sísmica en las direcciones "X" y "Y" con respecto a la estructura

El peso propio de la estructura es calculado directamente por el programa de análisis y sumado a la carga muerta de diseño, por lo cual, para definir la carga muerta se hace la suma del peso propio, más la carga muerta de diseño (SCM+DEAD= CM).

De acuerdo con el inciso 3.4 de la NTC-Criterios y acciones-2017, las combinaciones que se utilizarán en el proyecto son las siguientes: Combinaciones básicas de diseño.

- $(1.3 PP + 1.3 CM + 1.5 CVmax)$
- $(1.1 PP + 1.1 CM + 1.1 CVins + 1.1 SX + 1.1*0.3*SY)$
- $(1.1 PP + 1.1 CM + 1.1 CVins + 1.1 SX - 1.1*0.3*SY)$
- $(1.1 PP + 1.1 CM + 1.1 CVins - 1.1 SX + 1.1*0.3*SY)$
- $(1.1 PP + 1.1 CM + 1.1 CVins - 1.1 SX - 1.1*0.3*SY)$
- $(1.1 PP + 1.1 CM + 1.1 CVins + 1.1 SY + 1.1*0.3*SX)$
- $(1.1 PP + 1.1 CM + 1.1 CVins + 1.1 SY - 1.1*0.3*SX)$
- $(1.1 PP + 1.1 CM + 1.1 CVins - 1.1 SY + 1.1*0.3*SX)$
- $(1.1 PP + 1.1 CM + 1.1 CVins - 1.1 SY - 1.1*0.3*SX)$

Se realizaron más combinaciones para contemplar los casos de carga para el sismo en sus 4 direcciones correspondientes (Sx1, Sx2, Sy1, Sy2).

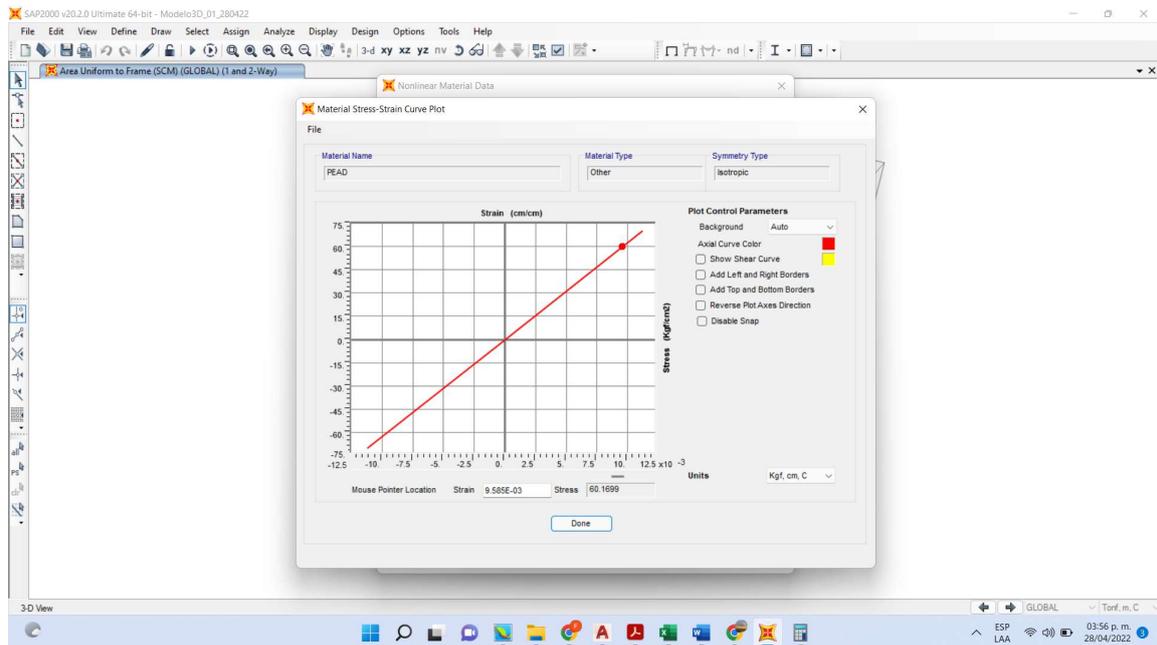


Figura 45. Esfuerzo-deformación dentro del programa SAP2000

El módulo de elasticidad ha sido introducido en la herramienta digital. También se han comprobado valores como es esfuerzo – deformación, para la realización del modelo.

### 4.3.2 Análisis de la estructura

#### SISMO

**Coefficiente sísmico.** Es la relación entre la fuerza cortante horizontal que actúa sobre la base de la edificación por efecto del sismo y el peso de la edificación sobre la base  $c = v/W$  Ecuación 31

Para las edificaciones clasificadas dentro del grupo B, de acuerdo al reglamento de construcciones, en su artículo 139 y de acuerdo a la zonificación para diseño por sismo, de acuerdo al artículo 170 se tomará como  **$c = 0.32$** .

Zona	c	a <sub>o</sub>	T <sub>a</sub> <sup>1</sup>	T <sub>b</sub> <sup>1</sup>	r
I	0.16	0.04	0.20	1.35	1.00
II	0.32	0.08	0.20	1.35	1.33
III <sub>a</sub>	0.40	0.10	0.53	1.80	2.00
III <sub>b</sub>	0.45	0.11	0.85	3.00	2.00
III <sub>c</sub>	0.40	0.10	1.25	4.20	2.00
III <sub>d</sub>	0.30	0.10	0.85	4.20	2.00

Tabla 16. Periodos en segundos, por zona sísmica en la Ciudad de México.

**Condiciones de regularidad.** A través de la siguiente tabla se realiza la revisión de la regularidad en la estructura, conforme al inciso 5 de la NTC de diseño por sismo.

Condición:	Valor límite	Modelo
1.- Los diferentes muros, marcos y demás sistemas sismo-resistentes verticales son sensiblemente paralelos a los ejes ortogonales principales del edificio. Se considera que un plano o elemento sismo-resistente es sensiblemente paralelo a uno de los ejes ortogonales cuando el ángulo que forma en planta con respecto a dicho eje no excede 15 grados.	-	La planta es rectangular. Cumple
2.- La relación de su altura a la dimensión menor de su base no es mayor que cuatro.	4	8.00/15.00= 0.53; Cumple
3.- La relación de largo a ancho de la base no es mayor que cuatro.	4	3.00/15.00= 2.00; Cumple
4.- En planta no tiene entrantes ni salientes de dimensiones mayores que 20 por ciento de la dimensión de la planta medida paralelamente a la dirección en que se considera el entrante o saliente.	20% de ancho o base	En planta no presenta entrantes o salientes de ningún tipo. Cumple
5.- Cada nivel tiene un sistema de piso cuya rigidez y resistencia en su plano satisfacen lo especificado en la sección 2.7 para un diafragma rígido.	-	Sólo se presenta la cubierta Cumple
6.- El sistema de piso no tiene aberturas que en algún nivel excedan 20 por ciento de su área en planta en dicho nivel, y las áreas huecas no difieren en posición de un piso a otro. Se exime de este requisito la azotea de la construcción.	20% A	En planta no presenta aberturas de ningún tipo. Cumple
7.- El peso de cada nivel, incluyendo la carga viva que debe considerarse para diseño sísmico, no es mayor que 120 por ciento del correspondiente al piso inmediato inferior.	-	Sólo tiene un nivel de cubierta Cumple
8.- En cada dirección, ningún piso tiene una dimensión en planta mayor que 110 por ciento de la del piso inmediato inferior. Además, ningún piso tiene una dimensión en planta mayor que 125 por ciento	-	Sólo tiene un nivel de cubierta Cumple

de la menor de las dimensiones de los pisos inferiores en la misma dirección.		
9.- Todas las columnas están restringidas en todos los pisos en las dos direcciones de análisis por diafragmas horizontales o por vigas. Por consiguiente, ninguna columna pasa a través de un piso sin estar ligada con él.	-	Todos los elementos que forman la estructura están restringidos en las direcciones "x" y "y" Cumple
10.- Todas las columnas de cada entrepiso tienen la misma altura, aunque esta pueda variar de un piso a otro. Se exime de este requisito al último entrepiso de la construcción.	-	Se presentan alturas variables en la estructura No cumple
11.- La rigidez lateral de ningún entrepiso difiere en más de 20 por ciento de la del entrepiso inmediatamente inferior. El último entrepiso queda excluido de este requisito.	-	Cumple
12.- En ningún entrepiso el desplazamiento lateral de algún punto de la planta excede en más de 20 por ciento el desplazamiento lateral promedio de los extremos de la misma.	-	Cumple
13.- En sistemas diseñados para Q de 4, en ningún entrepiso el cociente de la capacidad resistente a carga lateral entre la acción de diseño debe ser menor que el 85 por ciento del promedio de dichos cocientes para todos los entrepisos. En sistemas diseñados para Q igual o menor que 3, en ningún entrepiso el cociente antes indicado debe ser menor que 75 por ciento del promedio de dichos cocientes para todos los entrepisos. Para verificar el cumplimiento de este requisito, se calculará la capacidad resistente de cada entrepiso teniendo en cuenta todos los elementos que puedan contribuir apreciablemente a ella. Queda excluido de este requisito el último entrepiso.	-	Cumple

Tabla 17. Condiciones de regularidad en la edificación.

A continuación, se presenta un resumen de las condiciones de regularidad y sus resultados:

Condición:	Cumple/no cumple:
1	Cumple
2	Cumple
3	Cumple
4	Cumple
5	Cumple
6	Cumple
7	Cumple
8	Cumple
9	Cumple
10	No cumple
11	Cumple
12	Cumple
13	Cumple
Incumplimientos	1

Tabla 18. Resumen de las condiciones de regularidad.

**Factor de comportamiento sísmico.** De acuerdo a las Normas Técnicas Complementarias de Diseño por Sismo, la edificación consta de armaduras (vigas de alma abierta), que presentan ductilidad baja, por lo tanto, el factor a utilizar será de **Q=2** y la distorsión máxima será de 0.020.

	Alta	----	4.0	0.030
	Media	----	3.0	0.020
Marcos compuestos	Media	Vigas de alma abierta (armaduras) de <i>ductilidad alta</i>	3.0	0.020
	Media	Conexiones semirrígidas	3.0	0.020
	Baja	Vigas de alma abierta (armaduras) de <i>ductilidad baja</i>	2.0	0.015
	Baja	Marcos de <i>ductilidad baja</i>	2.0	0.015

Tabla 19. Factor de comportamiento sísmico.

**Nota:**

Se utilizó el programa PRODISIS, para obtener el espectro sísmico y sus ordenadas, las cuales fueron posteriormente introducidas en SAP2000.

**Corrección por irregularidad.** Se considerará irregular toda estructura que no satisfaga uno de los requisitos 5, 6, 9, 10, 11, 12 y 13, o dos o más de los requisitos 1, 2, 3, 4, 7 y 8 de la sección 5.1.

**Factor de hiperestaticidad.** Se tomará lo dispuesto en la sección 3.5 de las NTC de Diseño por sismo, en el cual se determina **K<sub>1</sub>=0.8** para sistemas estructurales de concreto, acero o compuestos que tengan menos de tres crujías resistentes a sismo en la dirección de análisis y dos o menos crujías resistentes a sismo en la dirección normal a la de análisis.

**Espectro de diseño sísmico.** Se usará la base de datos PRODISIS, que contiene espectros de diseño para toda la república mexicana.

Factor de importancia (Grupo): B2 (R.C.D.F. artículo 139)

Factor de irregularidad: 0.80

Factor de comportamiento sísmico (Q): 2.00

Factor de hiperestaticidad (k<sub>1</sub>): 0.80

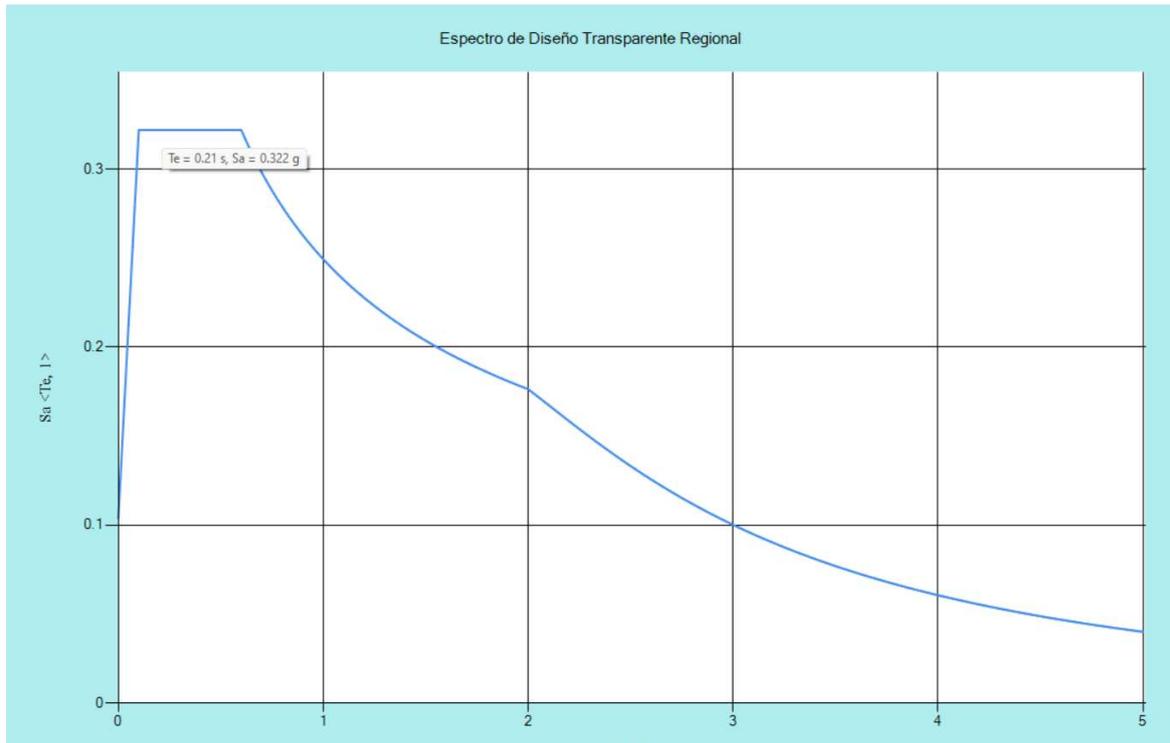
Primer periodo característico que delimitan la meseta del espectro de diseño (T<sub>0</sub>): 0.1

Segundo periodo característico que delimitan la meseta del espectro de diseño (T<sub>0</sub>): 0.6

Periodo natural de vibrar del sistema estructural (T): 1.1115

En el anexo 6 ordenadas del espectro sísmico, se muestran las ordenadas del espectro sísmico.

Gráfica 14. Espectro de diseño sísmico en la localidad elegida.



### Acciones por carga de sismo

Los elementos mecánicos generados por el caso de sismo serán obtenidos por medio de un análisis dinámico modal-espectral, donde se utilizará el espectro de diseño generado previamente por medio de la base de datos PRODISIS y se combinará con las formas modales de la estructura por medio de la combinación tipo "CQC", la resultante máxima de fuerza para el diseño se obtendrá por medio de la combinación direccional "SRSS".

Dentro del programa se obtendrán las formas modales por medio del procedimiento de vectores propios y se revisarán más adelante los porcentajes de participación de masa, así como el periodo fundamental de la estructura.

### Revisión del cortante basal mínimo

Se revisa el cortante aplicado a la base del edificio para verificar que sea mayor que el mínimo, mediante la siguiente ecuación:

$$V_o = 0.8 a \left( \frac{W_o}{Q'} \right) \quad \text{Ecuación 32}$$

Donde:

$W_0$ : peso de la edificación

$Q'$  = factor de reducción del comportamiento sísmico

$a$  = ordenada del espectro elástico de diseño como fracción de la aceleración de la gravedad

$W_0=79.74$  Ton;  $a=0.32$ ;  $Q'=1.60$ . El valor de cortante basal es 12.84 Ton, mientras que el mínimo requerido es 8.26 Ton, resultado de multiplicar el peso de la edificación por  $a_0$  (valor de  $a$  que corresponde a  $T = 0$  (aceleración máxima del terreno)). Por lo tanto, se cumple con la siguiente expresión:  
 $V_0 \text{ Basal} > a_0 * W_0$  Ecuación 33

Reacciones basales			
Caso	Eje x	Eje y	Eje z
Text	Tonf	Tonf	Tonf
Sx1	16.229	0.0368	0.7149
Sy1	0.0369	1.0481	0.0076
Sx2	16.229	0.0368	0.7149
Sy2	0.0369	1.0481	0.0076

Tabla 20. Reacciones basales de la estructura.

Mediante la anterior tabla se realiza una comparativa del análisis dinámico en SAP200, para las condiciones de carga sísmicas, las cuales tienen un valor mayor al cortante basal. Los cortantes presentados en ambas direcciones son mayores que el cortante mínimo, por lo tanto, no es necesario corregir el modelo.

### Revisión de los desplazamientos laterales.

Se ha realizado esta revisión de acuerdo con el inciso 1.9 de la NTC-diseño por sismo-2020, en el cual se establece que los desplazamientos laterales calculados se aumentaran en 0.003 veces la altura sobre el terreno en la zona II. Los resultados muestran que la deformación permisible es de 24 cm, mientras que la deformación del modelo es de 1.60 cm, la cual es aceptable.

Deformación permisible por sismo		
Altura	800.00	cm
Deformación permisible (0.003 H)	2.40	cm
Deformación presentada	1.60	cm

Tabla 21. Deformaciones permisibles por efectos de sismo, de acuerdo a las NTC de diseño por sismo

2020.

## VIENTO

Se han revisado los desplazamientos por los efectos del viento, con base en los análisis de la velocidad de diseño (Vd) y su incidencia sobre la estructura. Se han analizado las cargas que actúan sobre los nodos. De acuerdo a las NTC- para Diseño por Viento 2017. Se revisará que los desplazamientos relativos entre niveles consecutivos de edificios o entre secciones transversales de torres, causados por las fuerzas de diseño por viento, no excedan de los valores siguientes, expresados como fracción de la diferencia entre los niveles de piso o de las secciones transversales mencionadas:

- a) Cuando no existan elementos de relleno que puedan dañarse como consecuencia de las deformaciones angulares: 0.005;
- b) Cuando existan elementos de relleno que puedan dañarse como consecuencia de las deformaciones angulares: 0.002.

Se toma el valor de inciso a, siendo 4 cm, desplazamiento permisible, mientras que, en el análisis realizado en el modelo, el desplazamiento es de 0.65 cm.

Deformación permisible por viento		
Altura	800.00	cm
Deformación permisible (0.005 H)	4.00	cm
Deformación presentada	0.65	cm

Tabla 22. Deformaciones permisibles por efectos de sismo, de acuerdo a las NTC de diseño por viento 2017.

### 4.3.3 Diseño estructural

**Comportamiento a diferentes temperaturas.** En la tesis realizada por (Salcedo Cortés et al., 2015), se concluye la siguiente ecuación para determinar el factor de reducción por temperatura en el PEAD:

$$C_t = 0.0008(T)^2 - 0.0812(T) + 2.4196 \quad \text{Ecuación 34}$$

Donde:

T: temperatura a utilizar.

Se utilizará una temperatura de 30°C, por lo cual **C<sub>t</sub> = 0.7036** (factor mencionado en el capítulo 4.1.1).

**Comportamiento por relajación de esfuerzos a 10 años.** Se han tomado como referencia la tesis anteriormente citada, para utilizar una ecuación

que permita conocer un factor de reducción debido al comportamiento del material tras 10 años.

Los datos a introducir en el programa SAP 2000, 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:

$$F_c' = \left(\frac{F_c}{FS}\right) * C_{tc} * C_p \quad \text{Ecuación 35}$$

Donde:

- F<sub>c</sub>': esfuerzo permisible a compresión
- F<sub>c</sub>: esfuerzo resistente factorizado a 10 años
- FS: factor de seguridad (2.5)
- C<sub>tc</sub>: factor de reducción por temperatura
- C<sub>p</sub>: estabilidad elástica lineal (1)

$$F_c = \beta * F_{ct} \quad \text{Ecuación 36}$$

Donde:

- β= factor de reducción por 10 años de carga continua
- F<sub>ct</sub>= esfuerzo a la deformación de la prueba mecánica

$$F_c = (191.22 \text{ Kg/cm}^2)(0.78)$$

$$F_c = 149.15 \text{ Kg/cm}^2$$

$$F_c' = (149.15 \text{ Kg/cm}^2 / 2.5)(0.7036)(1)$$

$$F_c' = 41.97$$

En el caso de la resistencia admisible a la tensión se utilizarán las siguientes expresiones:

$$F_t' = \left(\frac{F_c}{FS}\right) * C_{tc} * C_p \quad \text{Ecuación 37}$$

Donde:

- F<sub>c</sub>': esfuerzo permisible a compresión
- F<sub>c</sub>: esfuerzo resistente factorizado a 10 años
- FS: factor de seguridad (2.5)

Ctc: factor de reducción por temperatura  
 Cp: estabilidad elástica lineal (1)

$$F_t = \beta * F_{ct} \quad \text{Ecuación 38}$$

Donde:

$\beta$ = factor de reducción por 10 años de carga continua

$$F_t = (182.69 \text{ Kg/cm}^2)(0.78)$$

$$F_t = 142.50 \text{ Kg/cm}^2$$

$$F_t' = (142.50 \text{ Kg/cm}^2/2.5)(0.7036)(1)$$

$$F_t' = 40.10 \text{ Kg/cm}^2$$

**Esfuerzo permisible del material.** Se realizará el diseño de las secciones, basado en la fuerza entre esfuerzo permisible del elemento. Para conocer el esfuerzo permisible de la sección se utilizará la ecuación

$$F_{perm} = F'c * A \quad \text{Ecuación 39}$$

Donde:

F'c: esfuerzo permisible de la sección.

A: área de la sección.

En el caso de los esfuerzos a compresión, al tener un área de sección cuadrada de 15 cm, se obtiene un área de 225 cm<sup>2</sup>. El esfuerzo a una deformación del 3% es 191.22 Kg/cm<sup>2</sup> y el permisible es de 41.97 Kg/cm<sup>2</sup>. Por lo tanto, el esfuerzo permisible de la sección es **F<sub>perm</sub> = 9,443.25 Kg**.

**Momento de inercia.** Para la sección cuadrada el momento de inercia se conoce mediante la siguiente ecuación:

$$I = \frac{BH^3}{12} \quad \text{Ecuación 40}$$

Donde:

B: lado base de la sección

H: lado alto de la sección

Tanto B, como H, son 15 cm. Al sustituir dichos valores en la ecuación se obtiene que el momento de inercia es **I = 4,218.75 cm<sup>4</sup>**.

**Radio de giro.** Para conocer el radio de giro se obtiene la raíz cuadrada de la relación entre el momento de inercia y el sección.

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad \text{Ecuación 41}$$

Donde:

I: momento de inercia

A: área de la sección

Los anteriores valores se conocen ( $I=4,218.75 \text{ cm}^4$ ;  $A=225 \text{ cm}^2$ ), por lo cual, el radio de giro es  **$r=4.33 \text{ cm}^2$** .

**Relación de esbeltez de la sección para compresión.** Mediante la siguiente ecuación se conoce la relación de esbeltez:

$$Sr = \frac{KLu}{r} < 28 \quad \text{Ecuación 42}$$

Donde:

K: coeficiente de pandeo (con relación a los apoyos del elemento)

Lu: largo efectivo del elemento en cm

R: radio de giro

El coeficiente de pandeo se considera  $K=0.5$ , el largo efectivo de la sección más larga es  $Lu=210 \text{ cm}$ , en el caso del radio de giro (obtenido anteriormente es  $r=4.33 \text{ cm}^2$ ). Al sustituir los valores dentro de la ecuación el resultado es  **$Sr=24.25$** , lo cual, es menor a 28 (Slaughter, 2004).

### Dimensiones de los elementos

Esfuerzo	Combinación de carga	Tipo de caso	Esfuerzo Ton	Área cm <sup>2</sup>	Dimensiones cm
Tensión	SX2	Estático lineal	3.6561	91.1745635	9.6
Compresión	COMB-D10	Combinación	-7.0099	-167.021682	13.0

Tabla 23. Dimensiones de los elementos

En la anterior tabla se muestran los máximos esfuerzos a compresión y a tensión, posteriormente con base en los esfuerzos permisibles del material, se obtienen las áreas de los perfiles. En el caso de compresión se utilizará un perfil de 9.6x9.6 cm y en tensión de 13.0 x 13.0 cm. Lo anterior, es resultado de la relación entre el esfuerzo de la estructura y el esfuerzo resistente del material, con lo cual, se obtiene el área de los perfiles.

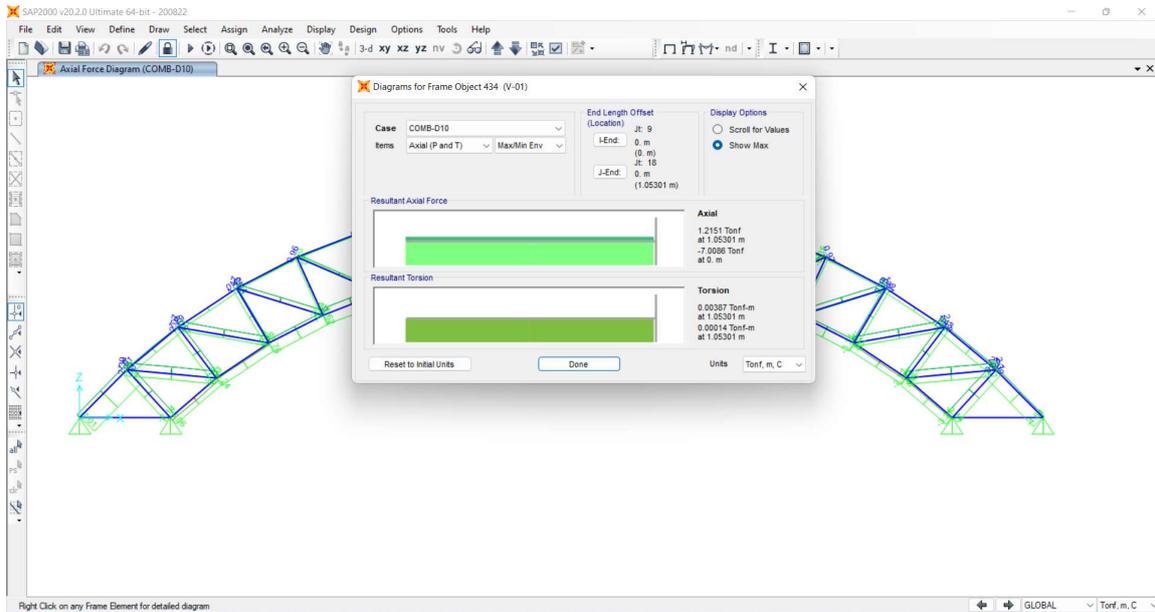


Figura 46. Resultados de los esfuerzos por viga

**Nota:**

Los resultados fueron analizados para la obtención de las dimensiones de los perfiles para vigas mediante SAP2000.  
Elaboración propia.

**4.4 Comparativa con otros materiales**

Se ha realizado una comparativa entre el material polietileno de alta densidad reciclado reforzado por fibra de vidrio y otros materiales que podrían ser utilizados para construir armaduras en cubiertas ligeras. Los aspectos considerados son el esfuerzo resistente a compresión y a tensión del material y en consecuencia las dimensiones de los perfiles, el peso volumétrico del material, su precio por metro y su precio colocado en la Ciudad de México. A continuación, se muestra la tabla comparativa:

Material	Esfuerzo permisible (Kg/cm <sup>2</sup> )	Dimensión de perfil (cm <sup>2</sup> )	Perfil	Peso (Kg)	Costo por m	Costo por m colocado
<b>Acero compresión</b>	1,440.00	4.62	OS 25.4 mm	3.97	\$131.11	\$ 324.47
<b>Acero tensión</b>	1,518.00	2.41	OS 19.1 mm	2.24	\$73.76	\$ 182.53
<b>Madera de pino compresión</b>	40.00	175.25	15 x 15	11.85	\$415.00	\$ 795.83
<b>Madera de pino tensión</b>	80.00	45.70	7 x 7	3.19	\$207.00	\$ 587.83
<b>PEADr</b>	191.22	19.12	4.5 x 4.5	2.0913	<b>\$37.33</b>	\$ 74.67
<b>PEADr</b>	182.69	38.37	6.1x 6.1	3.8308	<b>\$68.38</b>	\$ 152.50

<b>Madera plástica</b>	18.15	201.44	14.5x14.5	15.2642	\$ 541.60	\$ 570.42
<b>Madera plástica</b>	23.19	302.28	17.5x17.5	22.2338	\$ 631.86	\$ 830.88

Tabla 24. Comparativa de materiales

El material presentado resulta ser la opción más ligera en el caso de esfuerzos a compresión y la segunda en esfuerzos a tensión, debido a que el acero tiene una mayor resistencia a los esfuerzos en relación con su densidad. Los costos de material y manufactura permiten que el PEAD reciclado, reforzado por fibra de vidrio mantenga precios más bajos, de nuevo el esfuerzo resistente tiene un papel fundamental para la cantidad de material utilizada en la fabricación de perfiles, por lo que la ligereza del material es un aporte para un mayor rendimiento en la colocación de los perfiles.

## CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos de la experimentación y la comparación con los objetivos e hipótesis planteados, las conclusiones son las siguientes:

- Al integrar el 30% de fibra de vidrio de refuerzo, aumenta la densidad un 9.13% con respecto al polímero reciclado sin reforzar, se obtiene una media de 1.047 g/m<sup>3</sup>. Con la misma proporción la resistencia máxima a compresión aumenta 22.17%, con un resultado de 247.45 Kg/cm<sup>2</sup>, el esfuerzo a una deformación del 3% es 191.22 Kg/cm<sup>2</sup>, el cual fue utilizado para realizar el análisis estructural debido al comportamiento viscoelástico del material y lo determinado por las normas ASTM.
- Al realizar el análisis estadístico entre el peso volumétrico del material y la resistencia obtenida a compresión se tiene una alta correlación (0.988) con lo cual, el material aumenta o disminuye su resistencia en relación a la fracción volumétrica de fibra de vidrio. Sin embargo, el porcentaje límite debe ser investigado, debido a que un exceso de fibra, puede resultar en una interface deficiente con la matriz polimérica.
- Al realizar las pruebas de laboratorio, se observó el desprendimiento en las primeras probetas ensayadas, las cuales fueron fabricadas sin tratar la fibra de vidrio. El material no presenta fractura al llegar a su resistencia máxima, continua con su deformación y una resistencia menor a los esfuerzos conforme se continúa aplicando carga. Esto permite que el material continúe transmitiendo cargas dentro del sistema estructural antes del colapso.
- 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. Se obtuvo una resistencia a la tensión 229.16 Kg/cm<sup>2</sup> a la ruptura y 182.69 Kg/cm<sup>2</sup>, a una deformación del 3%. El peso volumétrico promedio de las probetas ensayadas fue de 1.041 g/m<sup>3</sup>, lo cual, es similar al presentado en las probetas para ensayos de esfuerzos a compresión. En este caso se presentó fractura al llegar al esfuerzo máximo.
- Los ensayos para relajación de esfuerzos han permitido conocer que la fibra de vidrio tiene aporte en la disminución del comportamiento viscoelástico del material, que en el caso del PEAD provocaba una alta disminución de su resistencia a los esfuerzos en periodos largos de tiempo, como el propuesto a 10 años. Esto, permite tener una mayor estabilidad en su resistencia y un uso prolongado, así como un

comportamiento estable en la aplicación de esfuerzos por debajo de su máxima resistencia

- El coeficiente viscoelástico presentó un valor de 16671.74 GPa\*min.
- Para el análisis de la estructura se introdujeron las cargas indicadas en el Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México y sus Normas Técnicas Complementarias. Dentro del análisis por sismo, se obtuvo una deformación de 1.60 cm, con 2.40 cm permisibles.
- En cuanto al análisis por viento, la deformación presentada fue 0.65 cm, con 4.00 cm permisibles. Los esfuerzos máximos presentados fueron -7.0099 toneladas a compresión y 3.6561 toneladas a tensión.
- Los resultados de las pruebas de laboratorio para los esfuerzos resistentes a compresión y a tensión fueron utilizados para encontrar las dimensiones de las secciones, las cuales fueron secciones cuadradas de 105.88 cm<sup>2</sup>, en una sección cuadrada de 10.30 cm para compresión y 177.92 cm<sup>2</sup>, en una sección cuadrada de 13.40 cm, para tensión.
- Al comparar el material, con otros convencionales utilizados en la construcción de armaduras para cubiertas, se observa que el acero tiene un esfuerzo resistente mayor, sin embargo, también cuenta con un mayor peso volumétrico, lo cual impacta económicamente. En el caso de las vigas utilizadas para esfuerzos a compresión, el costo es del 27.20% del costo de acero y en el caso de tensión es del 98.70 %. En comparación con otros materiales el costo es menor.
- En el aspecto constructivo la ligereza del material y su esfuerzo resistente a la tensión y compresión, permiten el uso de perfiles con un fácil manejo, debido a sus dimensiones y peso, lo cual, repercute de forma positiva en los rendimientos para la construcción.
- La fibra de vidrio además de aportar resistencia a los esfuerzos y poco aumento en el peso volumétrico, propicia que las vigas realizadas a partir de este material sean factibles de forma estructural por lo anteriormente mencionado. Es importante investigar los procesos de producción adecuados para una interface eficiente entre matriz y refuerzo. También, el comportamiento ante la temperatura el cual, a través de la regla de las mezclas, de forma teórica podemos observar que también disminuye.
- El pronóstico para las propiedades de materiales se ajustó a la matriz y refuerzo utilizado y se debe ajustar finalmente en relación a los resultados obtenidos, por lo que la investigación de polímeros e incluso de otros materiales reciclados presenta una amplia área para ser

desarrollada. En este caso al conocer el estado del arte, propiedades de materiales similares y ecuaciones de reglas de mezclas contrastado con un análisis estadístico de los resultados, se puede conocer que estos son similares a los previstos.

### **Prospección de escenarios futuros**

El resultado esperado va más allá de la producción del material (polietileno de alta densidad reciclado reforzado por fibra de vidrio) para la formación de perfiles estructurales plásticos reciclados. Se ha mostrado la importancia de fomentar el aprovechamiento al máximo de los materiales, según sus propiedades, características y campos de aplicación. Como se ha descrito en el ensayo historiográfico, los termoplásticos han sido aplicados a la construcción, sin embargo, su poca investigación y desarrollo de normativas ha impedido la extensión en su uso. Un mayor fomento a este tipo de investigación puede permitir una normatividad completa, que brinde la posibilidad de utilizar materiales plásticos reciclados en estructuras, paneles, muros y otros componentes de la arquitectura y la construcción.

Se cuenta con distintos escenarios para la investigación y para el desarrollo del material, los cuales siguen la misma línea de enfoque, sin embargo, con objetivos a futuro o variantes en estos. Dichos escenarios, no significan probabilidades desechadas, más bien son posibilidades a tomar en cuenta, ya sea por otros investigadores o dentro de una continuación a la investigación presentada. Los escenarios futuros toman una visión retrospectiva que proporciona la ciencia, para comprender el material y transportarlo a la visión prospectiva de la tecnología.

Es conocido que la tecnología del reciclaje ha incrementado de forma enorme desde los años 90. Basta con mirar las investigaciones realizadas por Thomas Nosker, de la Universidad de Rutgers, para darse cuenta del potencial y del crecimiento en cuanto al reciclaje de polímeros termoplásticos. A través de lo anterior, se puede mantener el ideal de mejorar la tecnología del reciclaje y su aplicación en los diversos campos de la arquitectura.

A continuación, se presentan escenarios de aportación a considerar:

- Matriz con otro polímero termoplástico, debido a que el estudio de materiales compuestos de matriz termoplástica, reforzados por fibras, permite la formación de modelos para el pronóstico de los resultados esperados y comportamiento del material.
- Refuerzo continuo unidireccional para controlar las propiedades del compuesto y determinar las propiedades anisotrópicas con ecuaciones establecidas por la mecánica de materiales, de una

manera más sencilla. Como, por ejemplo, el proceso de fabricación por pultrusión, el cual no fue accesible al de realizar la investigación.

## Referencias bibliográficas

- Acurio, G., Rossin, A., Paulo, T., & Francisco, Z. (2014). Diagnostico de la situación del manejo de residuos sólidos municipales en America Latina y el Caribe. *Croquis*.
- Álvarez Lara, L. (2011). *Estudio del Efecto del tipo de compatibilizante sobre el Grado de Dispersión de Nanoarcillas Purificadas y Sin Purificar, en sistemas LDPE/ EVA /Compatibilizante/Arcillas y su Influencia en la Degradación UV*. [Tesis para obtener el grado de Maestro en Tecnología de Polímeros, Centro de Investigación en Química Aplicada].  
<https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/179/1/Lidia%20Lara%20Alvarez%20maestria.pdf>
- ANIPAC. (2021). *Estudios ANIPAC*. <https://anipac.org.mx/estudios-anipac/>
- Askeland, D. R., Wright, W. J., Bhattacharya, D. k., Chhabra, R. P., Peralta Rosales, L., & Askeland, D. R. (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>
- Becerril, G.D. (2005). *Estudio del comportamiento mecánico del polietileno de alta densidad empleado para la fabricación de tubos de drenaje NMX-E-241* [Tesis para obtener el título de ingeniero mecánico electricista.]. Universidad Nacional Autónoma de México.

- 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. (1995a). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Reverte.
- Callister, W. D. (1995b). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Reverte.
- Carroll, D. R., Stone, R. B., Sirignano, A. M., Saindon, R. M., Gose, S. C., & Friedman, M. A. (2001). Structural properties of recycled plastic/sawdust lumber decking planks. *Resources, Conservation and Recycling*, 31(3), Art. 3. [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.
- Colomer, F.J & Gallardo, A. (2007). *Tratamiento y gestión de residuos sólidos*. Limusa.
- Demjén, Z., & Pukánszky, B. (1997). Effect of surface coverage of silane treated CaCO<sub>3</sub> on the tensile properties of polypropylene composites. *Polymer Composites*, 18(6), 741-747. <https://doi.org/10.1002/pc.10326>
- García Garduño, J. M., & Santa Ana Lozada, P. R. (2017). *Componentes ligeros: Plásticos reforzados con fibra de carbón en la arquitectura* [Tesis para obtener el grado de: Maestro en Arquitectura]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- González Flores, F. (2009). *Análisis y Diseño Estructural de una Nave Industrial para una Planta de Reciclaje de Desechos Sólidos, bajo Efecto de Sismo y Viento con el Criterio del Reglamento de Construcciones del D.F y sus N.T.C y el Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad* [Tesis Profesional

- para obtener el Título de Ingeniero Civil, Instituto Politécnico Nacional].  
<https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/4197/ANALISISYDISENO.pdf>
- Goodman, S. H., & Dodiuk, H. (2014). *Handbook of Thermoset Plastics—3rd Edition* (3ra ed.). Elsevier. <https://www.elsevier.com/books/handbook-of-thermoset-plastics/dodiuk/978-1-4557-3107-7>
- Goodship, V. (2007). *Introduction to Plastics Recycling*. iSmithers Rapra Publishing.
- Greelane. (2018). *La fascinante historia de materiales compuestos de plástico* .  
[www.greelane.com](http://www.greelane.com) - Recursos para la Educación más grande del mundo.  
<https://www.greelane.com/es/ciencia-tecnolog%C3%ADa-matem%C3%A1ticas/ciencia/history-of-composites-820404/>
- Gupta, V. B., & Kothari, V. K. (Eds.). (1997). *Manufactured Fibre Technology*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-5854-1>
- Hoornweg, D., & Bhada-Tata, P. (2012). What a waste: A global review of solid waste management. *Urban Dev Ser Knowl Pap*, 15, 87-88.
- Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). Plastics recycling: Challenges and opportunities. En *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0311>
- Hosler, D., Burkett, S. L., & Tarkanian, M. J. (1999). Prehistoric Polymers: Rubber Processing in Ancient Mesoamerica. *Science*, 284(5422), 1988-1991.  
<https://doi.org/10.1126/science.284.5422.1988>
- James, A. (2005). *Análisis y Diseño de Estructuras*. LIMUSA Wiley
- Lampo, R. G., & Nosker, T. J. (1997). *Construction Productivity Advancement Research (CPAR) Program: Development and Testing of Plastic Lumber Materials for*

*Construction Applications.*: Defense Technical Information Center.

<https://doi.org/10.21236/ADA328449>

Lampo, R., Nosker, T., Bamo, D., Busel, J., & Maher, A. (1998). *Development and Demonstration of FRP Composite Fender Loadbearing, and Sheet Piling Systems.*

Undefined. /paper/Development-and-Demonstration-of-FRP-Composite-and-

Lampo-Nosker/6f8d9283ca44b6e726811f0feb2e5ec76e468bc4

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).

<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](http://up-rid2.up.ac.pa:8080/xmlui/handle/123456789/1822)

Mariano. (2011, marzo 6). Fibra de vidrio | Tecnología de los Plásticos. *Fibra de vidrio |*

*Tecnología de los Plásticos.*

<https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/12/fibra-de-vidrio.html>

Martin Piris, N., Güemes Gordo, A., Martín Piris, N., 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.
- McNaught, A.D. & Wilkinson, A. (1997). *Macromolecule (polymer molecule)* [Blackwell Scientific Publications, Oxford]. Compendium of Chemical Terminology, 2nd ed. (the «Gold Book»). <https://doi.org/10.1351/goldbook.M03667>
- Neri Del Castillo, L. (2013). *Estudio del efecto de fibras de politereftalato de etileno (PET) reciclado como agentes de refuerzo en una matriz de polietileno de alta densidad (HDPE)* [Tesis para obtener el título de: Ingeniera Química]. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza.
- Pérez González, R. R., Eguiluz Senior, M., Ocampo Ruíz, E., Rangel Dávalos, J., Solano Vega, A., & Cabeza Pérez, A. (2015). *Reaprovechamiento del plástico en elementos arquitectónicos* (Facultad de Arquitectura. Posgrado).
- Polietileno de alta densidad*. (s. f.-a). Recuperado 25 de diciembre de 2020, de [/cmematerials/es/content/polietileno-de-alta-densidad](#)
- Polietileno de alta densidad*. (s. f.-b). Recuperado 6 de noviembre de 2020, de [/cmematerials/es/content/polietileno-de-alta-densidad](#)
- Presidencia de la República. (2017). *Informe del Medio Ambiente*. <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap7.html>
- Pulipati, D. P., & Jack, D. A. (2020). Characterization and Model Validation for Large Format Chopped Fiber, Foamed, Composite Structures Made from Recycled Olefin Based Polymers. *Polymers*, 12(6), 1371. <https://doi.org/10.3390/polym12061371>
- Recycled Plastic Lumber Feature*. (s. f.). Recuperado 30 de diciembre de 2020, de [https://www.astm.org/SNEWS/DECEMBER\\_2001/wsd\\_dec01.html](https://www.astm.org/SNEWS/DECEMBER_2001/wsd_dec01.html)

Reinhart, T.J. (1990). Polymer-matrix composites. *Polymer-matrix composites*, 137(1), Art. 1.

Rodríguez-Bruceta, P. A., Pérez-Rodríguez, Á. T., & Velázquez-Infante, J. C. (2015). Propuesta de un procedimiento para el reciclado del polietileno de alta densidad. *Revista Cubana de Química*, 27(1), 32-54.

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) [Tesis para obtener el grado de: Maestro en Arquitectura]. Universidad Nacional Autónoma de México.

Santa Ana Lozada, P.R. (2018). *Sistemas estructurales*. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Arquitectura. <http://up-rid2.up.ac.pa:8080/xmlui/handle/123456789/1822>

Santiago, M. O., Marín, C. G., & Fernández, J. R. (2003a). Los composites. Características y aplicaciones en la edificación. *Informes de la Construcción*, 54(484), Art. 484. <https://doi.org/10.3989/ic.2003.v54.i484.568>

Santiago, M. O., Marín, C. G., & Fernández, J. R. (2003b). Los composites. Características y aplicaciones en la edificación. *Informes de la Construcción*, 54(484), Art. 484. <https://doi.org/10.3989/ic.2003.v54.i484.568>

Satya, S. K., & Sreekanth, P. S. R. (2020). An experimental study on recycled polypropylene and high-density polyethylene and evaluation of their mechanical properties. *Materials Today: Proceedings*, 27, 920-924. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.259>

- Slaughter, A. E. (2004). *Design and fatigue of a structural wood-plastic composite* [Tesis para obtener el título de Maestro de Ciencias en Ingeniería Civil]. Washington State University, Department of Civil and Environmental Engineering.
- 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.
- Sperling, L. H. (2005). *Introduction to Physical Polymer Science* (1.<sup>a</sup> ed.). Wiley.  
<https://doi.org/10.1002/0471757128>
- Wallenberger, F. T., & Bingham, P. A. (2010). *Fiberglass and glass technology: Energy-friendly compositions and applications*. Springer.
- Wang, J., Zhi, T., Jinping, P., Qiongquan, Q., & Meimin, L. (2016). The behaviors of microplastics in the marine environment. *Marine Environmental Research, Elsevier, Volume 113*, 7-17.

## ÍNDICE DE IMÁGENES

Figura 1. Enlaces covalentes. ....	12
Figura 2. Ejemplo de estricción.....	13
Figura 3. Clasificación de los materiales compuestos .....	25
Figura 4. Clasificación de los materiales. ....	27
Figura 5. Diagrama de fabricación para la fibra de vidrio E. ....	30
Figura 6. Fabricación de la fibra de vidrio. ....	30
Figura 7. Porcentaje de residuos sólidos urbanos generados.....	37
Figura 8. Desechos plásticos que podrían convertirse en residuos. ....	38
Figura 9. Diagrama de reciclaje de polímeros .....	40
Figura 10. Jerarquía para la gestión de residuos. Criterios para aprovechar los residuos con la menor contaminación y reducción del impacto ambiental. ....	41
Figura 11. Reciclaje de desechos plásticos. ....	44
Figura 12. Esquema para el proceso de reciclaje en los termoplásticos. ....	46
Figura 13. Mirador Tiffany Street NY, EE UU .....	52
Figura 14. Puente de termoplásticos Leonard Wood, Missouri. ....	53
Figura 15. Puente en forma de arco, construido por McLaren Consulting Engineers, en NY .....	54
Figura 16. Vigas en forma de I, en Wharton State Forest, Nueva Jersey. ....	55
Figura 17. Primer puente de termoplásticos reciclados. ....	56
Figura 18. Fabricación de pilotes marítimos, con matriz polimérica termoplástica. ....	58
Figura 19. Diagrama del método a implementar en la investigación.....	63
Figura 20. Monómeros y su repetición para formar polímeros.....	64
Figura 21. Pellets de polietileno de alta densidad. ....	65
Figura 22. Producción de pellets polímero – fibra de vidrio.....	65
Figura 23. Fibra de vidrio corta clase E.....	66
Figura 24. Dimensiones planeadas de la probeta según especificaciones de la norma ASTM D 6108-03.....	75
Figura 25. Tipos de falla de acuerdo a la norma ASTM D 6108-03. ....	76
Figura 26. Medición de piezas para pruebas de laboratorio. ....	77
Figura 27. Pruebas de laboratorio a compresión realizadas en el LMSE de la Facultad de Arquitectura UNAM .....	79
Figura 28. Medida seleccionada de la norma ASTM D638-14. ....	82
Figura 29. Máquina de pruebas universales utilizada para las pruebas a tensión. LMSE, Facultad de Arquitectura UNAM. ....	85
Figura 30. Preparación de las probetas para la prueba de relajación de esfuerzos.....	87
Figura 31. Prueba de relajación de esfuerzos.....	88

Figura 32. Máquina de análisis termogravimétrico. Instituto de Investigaciones en Materiales de UNAM. ....	98
Figura 33. Colocación de muestra de PEAD reciclado en la charola para el posterior análisis térmico. ....	98
Figura 34. Pesaje de la muestra de PEAD reciclado en báscula, para introducir dato en la máquina para análisis DSC.....	99
Figura 35. Realización de prueba de escaneo diferencia de barrido. Instituto de Investigaciones en Materiales de UNAM. ....	100
Figura 36. Velocidades regionales en la Ciudad de México, según la importancia de la construcción.....	102
Figura 37. Factor correctivo por topografía y rugosidad. ....	103
Figura 38. Coeficientes de presión, para cubiertas en arco.....	104
Figura 39. Concepto estructural para el proyecto de aplicación.....	107
Figura 40. Diagrama de cuerpo libre. Proyecto de cubierta.....	107
Figura 41. Conexiones para la estructura a base de armaduras.....	107
Figura 42. Modelo 3d en SAP2000.....	111
Figura 43. Asignación de cargas.....	111
Figura 44. Resultados de los esfuerzos por viga.....	123

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Esfuerzo - deformación, para pruebas a compresión.....	78
Gráfica 2. Grafica de regresión lineal entre esfuerzo resistente a compresión y densidad.....	80
Gráfica 3. Esfuerzo - deformación pruebas de laboratorio a tensión.....	83
Gráfica 4. Regresión lineal para valores de densidad - resistencia máxima a la tensión.....	84
Gráfica 5. Regresión lineal entre densidad y fracción volumétrica de fibra de vidrio. ....	96
Gráfica 6. Análisis termogravimétrico TGA, realizado a polietileno de alta densidad reciclado, utilizado en las probetas. ....	97
Gráfica 7. Resultados del análisis DSC, en cual se observa el punto más bajo de la gráfica, la temperatura de fusión y el más alto de la gráfica, donde se encuentra la temperatura de cristalización.....	100
Gráfica 8. Espectro de diseño sísmico en la localidad elegida. ....	117

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de producción para el material compuesto a base de polietileno de alta densidad reciclado(matriz) y fibra de vidrio corta (refuerzo).....	72
Tabla 2. Normatividad aplicada al Proyecto. ....	73

Tabla 3. Definición del tamaño de la muestra y parámetros de prueba para la caracterización mecánica. Normas ASTM del subcomité D20.20. ....	74
Tabla 4. Valores de PEAD reciclado, polímero virgen y resultados esperados. ....	76
Tabla 5. Resultados de las pruebas de laboratorio, para esfuerzos a compresión. ....	76
Tabla 6. Datos estadísticos para las pruebas de laboratorio a compresión. ....	77
Tabla 7. Datos estadísticos de la regresión lineal entre la densidad y la resistencia a la compresión con una deformación del 3%. ....	80
Tabla 8. Valores de PEAD reciclado, polímero virgen y resultados esperados, propiedades de tensión. ....	81
Tabla 9. Base de datos para los valores de propiedades de resistencia a la tensión obtenidos. ....	84
Tabla 10. Datos estadísticos de la regresión lineal entre la densidad y la resistencia a la compresión con una deformación del 3%. ....	85
Tabla 11. Datos para los porcentajes de fibra de vidrio y densidad, en el material compuesto. ....	95
Tabla 12. Cargas utilizadas para el proyecto. ....	110
Tabla 13. Pesos calculados en la estructura. ....	112
Tabla 14. Periodos en segundos, por zona sísmica en la Ciudad de México. ....	114
Tabla 15. Condiciones de regularidad en la edificación. ....	115
Tabla 16. Resumen de las condiciones de regularidad. ....	115
Tabla 17. Factor de comportamiento sísmico. ....	116
Tabla 18. Reacciones basales de la estructura. ....	118
Tabla 19. Deformaciones permisibles por efectos de sismo, de acuerdo a las NTC de diseño por sismo 2020. ....	118
Tabla 20. Deformaciones permisibles por efectos de sismo, de acuerdo a las NTC de diseño por viento 2017. ....	119
Tabla 21. Dimensiones de los elementos. ....	122

## ANEXOS

### Anexo 1. Ecuaciones en proceso experimental

Con base en la hipótesis planteada se determinará la capacidad estructural del compuesto estudiado a través de métodos de caracterización cuya obtención de información para alcanzar los objetivos, es la siguiente:

Densidad y peso específico (ASTM D-6111)

Coefficiente de expansión térmica lineal (ASTM D-6341)

Comportamiento mecánico bajo esfuerzos de compresión (ASTM D-6108)

Comportamiento mecánico bajo esfuerzos de tensión (ASTM D-638)

- Resistencia a la compresión. Se obtiene mediante el esfuerzo de la probeta al alcanzar un 3% de deformación. Se aplica la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Donde:

$\sigma$ = esfuerzo (Kg/cm<sup>2</sup>)

P= carga axial a compresión (Kgf)

A= área de la superficie que recibe el esfuerzo (cm<sup>2</sup>)

- Módulo de elasticidad. Se obtiene a partir de cualquier punto de la recta CD gráfica \_\_: gráfica de esfuerzo deformación (ASTM 6108-03)

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1}$$

Donde:

E= módulo de elasticidad (Kg/cm<sup>2</sup>)

$\sigma_2$ = Esfuerzo al punto mayor de la recta (Kg/cm<sup>2</sup>)

$\sigma_1$ = Esfuerzo al punto menor de la recta mm/mm

$\epsilon_2$ = Esfuerzo al punto mayor de la recta mm/mm

- La deformación real se realiza a los 0.03 mm/mm. El punto B, es el cero real de la deformación.
- El módulo secante se obtiene de trazar una línea perpendicular a la deformación 0.01, de donde se obtiene el punto GA. A partir de este, se traza una línea hasta B. La línea resultante es el módulo secante.
- El promedio de la desviación estándar, se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$s = \sqrt{\frac{(\sum x^2 - nX^2)}{n - 1}}$$

S= desviación estándar

x= valor de una observación

n= número de observaciones

X= Promedio de grupo de observaciones

- Para el caso de la velocidad de prueba en los ensayos a tensión se utilizará la siguiente expresión:

$$\frac{0.185ZL^2}{d}$$

Donde:

R= velocidad de aplicación de la carga (mm/min)

L= claro del soporte en mm

D= profundidad de la viga en mm

Z= promedio de la deformación de las fibras exteriores mm/mm/min la cual debe ser 0.03.

La velocidad no debe ser mayor o menor en un 50% del resultado de la anterior expresión.

En caso de que la fractura no se produzca antes de la siguiente expresión, el método de prueba no podrá definir la resistencia real del material, sin embargo, será posible realizar un acercamiento.

$$D = \frac{0.21rL^2}{d}$$

Donde:

D= deflexión al centro de la probeta (mm)

r= velocidad de la deformación (mm/mm/min)

L= longitud del claro (mm)

d= profundidad de la probeta (mm)

- El cálculo de la deformación de la deformación del material a cada segundo se realiza mediante la siguiente expresión:

$$r = \frac{4.70Dd}{L^2}$$

r= deformación (mm/mm)

D= deflexión al centro de la probeta (mm)

d= profundidad de la probeta (mm)

L= longitud del claro (mm)

- El esfuerzo producido en las fibras exteriores de la probeta a cada segundo registrado se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{PL}{Bd^2}$$

Donde:

$\sigma$ = esfuerzo (Kg/cm<sup>2</sup>)

P= carga sobre la probeta (Kgf)

L= longitud del claro (mm)

b=ancho de la probeta

d= profundidad de la probeta (mm)

- El módulo secante al 1% de la deformación se calcula mediante la siguiente expresión:

$$Eb = 0.21L^3 \frac{m}{Bd^3}$$

Donde:

Eb= módulo secante (Kg/cm<sup>2</sup>)

m=pendiente al 1% de la deformación (Kg/cm<sup>2</sup>)

L= longitud del claro (mm)

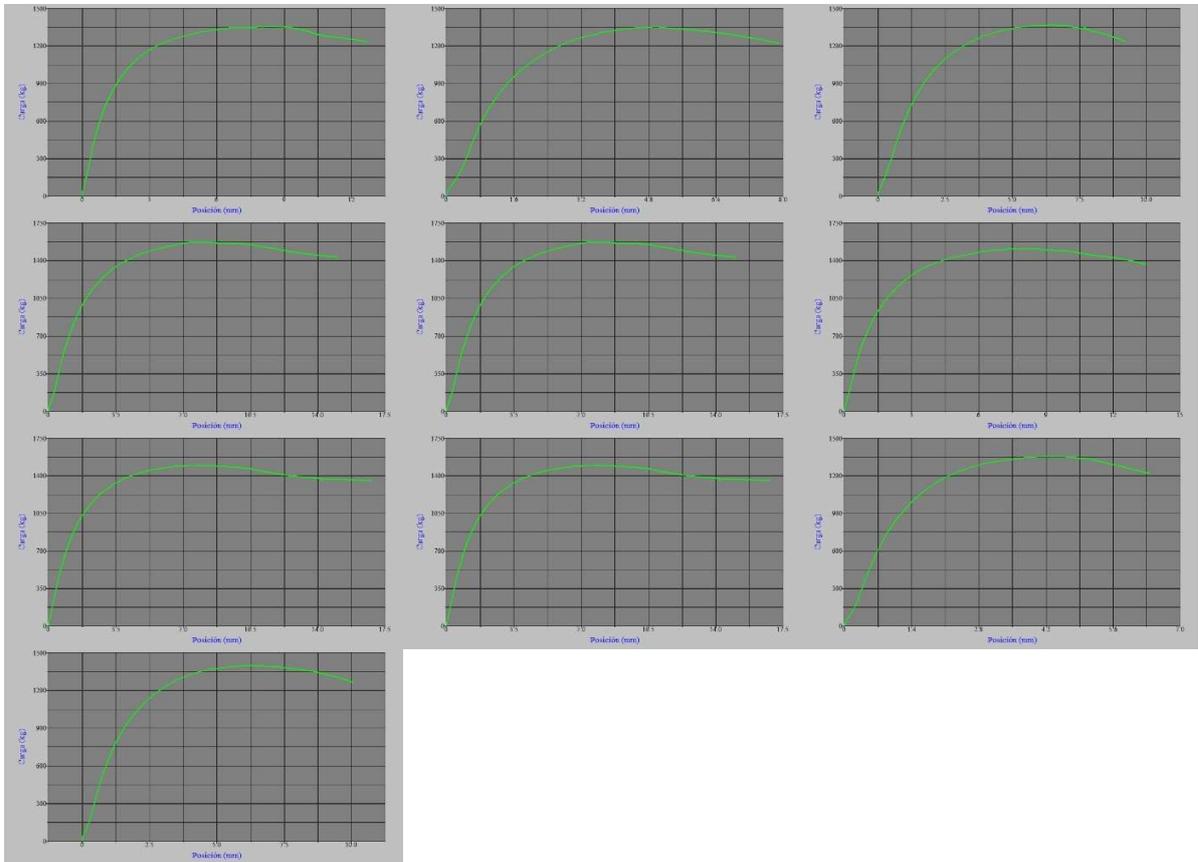
b=ancho de la probeta

d= profundidad de la probeta (mm)

## Anexo 2. Gráficas esfuerzo - deformación.

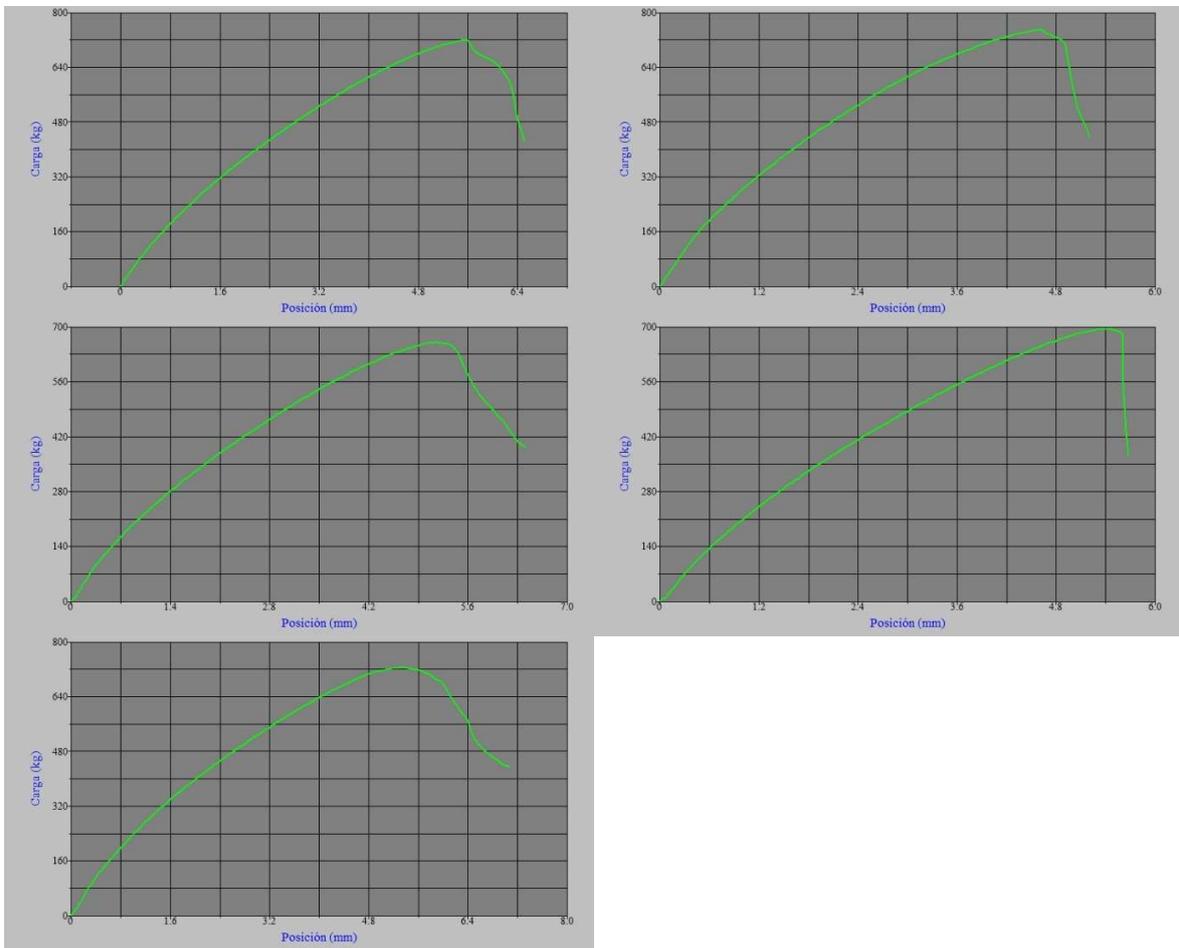
Se muestran las gráficas obtenidas de forma directa en la máquina de pruebas universales del Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales de la Facultad de Arquitectura UNAM, campus C.U.

Gráficas esfuerzo – deformación para pruebas a compresión



Poliétileno de alta densidad reciclado reforzado por fibra de vidrio.  
 Aplicación estructural en la arquitectura.

Graficas esfuerzo – deformación para pruebas a tensión



Polietileno de alta densidad reciclado reforzado por fibra de vidrio.  
Aplicación estructural en la arquitectura.

### Anexo 3. Protocolo experimental

Todos los ensayos realizados tuvieron fundamento en las Normas ASTM, subcomité D20.20, las cuales fueron tomadas para la realización del protocolo experimental, donde se transcriben y adaptan los procedimientos.

#### Pruebas mecánicas

Con base en las normas ASTM del comité D 20, aplicadas a plásticos y plásticos reciclados, así como formas de madera plástica, se realizarán las siguientes pruebas a través de las cuales se determinarán las propiedades del material compuesto de PEAD reciclado reforzado con fibra de vidrio.

##### 7.4.4 Compresión:

La prueba se aplica a formas de madera plástica cuando la sección transversal se carga a compresión con tasas relativamente bajas y uniformes de esfuerzo o carga. Se emplean las muestras del material tal como se fabrica.

Las dimensiones propuestas para las probetas donde se determinará la resistencia a la compresión de la mezcla son de 10 x 10 x 20 cm.

##### Máquina de prueba:

Cualquier máquina de prueba adecuada capaz de controlar el movimiento de la cruceta de velocidad constante y que se compone esencialmente de:

- Mecanismo de transmisión: transmite una tasa uniforme y controlada de movimiento de la cruceta con respecto a la base.
- Indicador de carga: mecanismo indicador de carga capaz de mostrar la carga de compresión total soportada por la prueba. La precisión de la máquina debe ser revisada por lo menos una vez al año. El mecanismo estará esencialmente libre de retraso de inercia a la velocidad especificada de ensayo.
- Compresómetro: instrumento adecuado para determinar la distancia entre dos puntos fijos en la muestra de prueba, en cualquier momento durante la prueba. Es favorable que el instrumento registre datos automáticamente. Deberá estar esencialmente libre de retardo de inercia a la tasa de carga especificada.
- El movimiento de la platina de compresión puede usarse para determinar los desplazamientos de compresión de las muestras de prueba.
- Platos de compresión: son platos para aplicar carga a la muestra. Se utilizarán platos paralelos para aplicar la carga a una muestra de tipo no confinado. Uno de los platos de compresión será autoalineable para que la carga se pueda aplicar uniformemente sobre la cara de la muestra.

- Micrómetro: con precisión de 0.01 pulg.

Muestras de ensayo:

Se debe tener cuidado al cortar y alisar, para que las superficies lisas, planas y paralelas resulten en bordes nítidos y limpios. Se ajusta la cruceta de la máquina de prueba hasta que entra en contacto con la parte superior de la placa de compresión. La probeta debe estar dentro de  $1/300$  (0.0033) de la longitud de la muestra perpendicular al eje mayor de la muestra.

Las dimensiones serán en forma de cilindro recto o prisma cuya altura es el doble de su ancho o diámetro mínimo. Por lo anterior, se determinaron las dimensiones de 10 x 10 x 20 cm. Al ensayar perfiles huecos, la muestra de ensayo debe tener una longitud igual al doble de su sección transversal mínima dimensión.

Número de probetas:

Se ensayarán cinco especímenes para cada muestra.

Acondicionamiento de las probetas:

se acondicionarán a  $23\text{ °C} \pm 2$ , con humedad relativa del  $50\% \pm 2$  no menos de 40 hrs previas al ensayo

Velocidad de la prueba:

Se debe configurar el control de velocidad para que resulte en una tasa de deformación de  $0.03 \pm 0.003$  mm/mm/min. Se debe registrar la carga máxima soportada por la muestra o registrar el valor de carga cuando el valor especificado de deformación (3% o 0.03 in. /in. [mm / mm]). De requerir las pruebas con tensión se procede a configurar el control de velocidad para que dé como resultado una tasa de deformación de  $0.03 \pm 0.003$  in. /in. /min [mm / mm / min] e iniciar la prueba. Se deben registrar las cargas y la deformación compresiva correspondiente a intervalos apropiados de esfuerzo o, si la máquina de prueba está equipada con un dispositivo de grabación automática, registrar la curva completa carga-deformación. Se debe continuar la prueba hasta que la prueba hasta que la muestra falle o llegue al valor especificado de deformación (3% o 0.03 in. /in. [mm / mm]).

Procedimiento:

Medir el ancho y el espesor o el diámetro de espécimen con una precisión del 1% de la dimensión medida en varios puntos a lo largo de su longitud. Se deben colocar las muestras de ensayo entre las superficies de los platos de compresión, teniendo cuidado de alinear la línea central de su eje largo con la línea central de los platos para asegurar que los extremos de la muestra son paralelos a la superficie de los platos. Se debe ajustar la cruceta de la máquina de prueba hasta que entre en contacto con la parte superior de la placa de compresión. Se debe conectar el

compresómetro en caso de utilizarlo. Configurar el control de velocidad para que dé como resultado una tasa de deformación de  $0.03 \pm 0.003$  in./in./min [mm / mm / min] con una pre-carga de 500 Kgf e iniciar la prueba, la cual se espera tenga una duración de 1 a 5 minutos. Registrar las cargas y la deformación compresiva correspondiente a intervalos apropiados de esfuerzo o si la máquina de prueba está equipada con un dispositivo de grabación automática, registrar los resultados de la curva completa de carga-deformación. Se debe continuar la prueba hasta que la muestra falle o el valor especificado de deformación (3% o 0.03 in. /in. [mm / mm]).

Cálculo:

La resistencia a la compresión se obtiene a partir del esfuerzo que resistió la probeta en el punto de fractura o el momento en el cual alcanza el 3% de deformación mediante la siguiente expresión:

$$\sigma = P/A$$

Donde:

$\sigma$  = esfuerzo (Kg/cm<sup>2</sup>)

P = carga axial a la compresión (Kgf)

A = área de la superficie que recibe el esfuerzo (cm<sup>2</sup>)

Este valor da a conocer la resistencia última a la compresión, el cual será utilizado para el cálculo de la sección resistente de cada pieza.

El módulo de elasticidad es un valor que relaciona el esfuerzo y la deformación constantes que mantiene el material durante algún esfuerzo, en este caso es el esfuerzo a compresión. La gráfica 1, indica como se obtiene lo anteriormente descrito.

Cualquier punto de la línea CD, puede ser utilizado para determinar el módulo de elasticidad, al dividir el esfuerzo entre la deformación del punto elegido.

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\xi_2 - \xi_1}$$

Donde:

E = módulo de elasticidad (Kg/cm<sup>2</sup>)

$\sigma_2$  = esfuerzo al punto mayor de la recta (Kg/cm<sup>2</sup>)

$\sigma_1$  = esfuerzo al punto menor de la recta (Kg/cm<sup>2</sup>)

$\xi_2$  = deformación unitaria mayor de la recta (mm/mm)

$\xi_1$  = deformación unitaria menor de la recta (mm/mm)

El punto B, es el cero real de la deformación. Lo que existe antes se desprecia debido al acoplamiento que realizan los platos en la superficie de la sección de la probeta donde hacen el esfuerzo. Por lo tanto, se obtiene la deformación real a partir de ese punto hasta llegar al 0.03 mm/mm de deformación.

El módulo secante se obtiene al trazar una línea perpendicular a la deformación 0.01. Con lo anterior, se obtiene el punto GA, a partir de ese punto se traza otra línea recta hacia el punto B (cero real). La pendiente producida por estos dos puntos, será el módulo secante el cual se define de la siguiente manera: valor de esfuerzo del punto elegido / el valor de deformación elegido.

El esfuerzo a una deformación dada es el esfuerzo que corresponde al punto donde la deformación de la probeta alcanza 0.03 mm/mm, punto H.

Se calcula el promedio de cada uno de los valores obtenidos de ellas y se aplica el cálculo de desviación estimada conforme a la siguiente fórmula:

s= desviación estándar estimada

X= valor de una simple observación

n= número de observaciones

$\bar{X}$ = promedio de grupos de observaciones

En caso de que la muestra presente una deformación de punto de fluencia compresiva o fracturas antes de un 3%, se debe calcular la resistencia a la compresión dividiendo la carga de compresión máxima soportada por la muestra durante la prueba entre el mínimo original o la sección transversal efectiva área de la muestra.

#### 7.4.4.8 Reporte:

El reporte debe comprender los siguientes apartados de identificación y especificación tanto del material, como de las pruebas.

- Identificación completa del material probado, incluido el tipo, la fuente, el número de código del fabricante, la forma, dimensiones, e historia previa
- Nombre del laboratorio
- Fecha de la prueba
- Método de preparación de probetas
- Tipo de probeta, de ensayo y dimensiones
- Procedimiento de acondicionamiento utilizado, si se ha empleado un acondicionamiento no estándar
- Condiciones atmosféricas en la sala de pruebas, si no son estándar o se ha empleado el acondicionamiento
- Número de probetas ensayadas y dirección de carga con respecto al eje de extrusión.
- Velocidad de la prueba
- Resistencia mecánica (según el tipo de prueba)
- Módulo de elasticidad o módulo secante al 1% deformación, valor medio, desviación estándar

- Comportamiento de la muestra o modo de falla durante la prueba, conforme a la siguiente figura.

Tensión:

Método de prueba

Los ensayos realizados se harán con base en la norma ASTM D638-14 Método de prueba estándar para las propiedades de tensión de los plásticos. 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.

Este método de prueba es aplicable para materiales de grosor hasta 14 mm. El método de prueba incluye la opción de determinar el módulo de Poisson a temperatura ambiente. La norma ISO 527-1, aborda también el mismo tema con enfoque técnico distinto. El método de prueba se puede utilizar para probar resinas o laminados, sin funcionar como aislamiento eléctrico.

Máquina de prueba

Componentes:

- Miembro fijo: es un elemento estático que contiene una empuñadura y mantiene fijo al material de ensayo
- Miembro móvil: es un segundo agarre que produce el movimiento para la prueba.
- Empuñaduras: sujetan la muestra de prueba entre el miembro fijo y el móvil de la prueba. La máquina puede tener mecanismo autoalineable. En el caso de las mordazas fijas, se encuentran sujetas de forma rígida a los miembros estáticos y móviles de la máquina de prueba, para fijar el material de prueba se debe insertar y sujetar, de modo que el eje mayor de la prueba coincida con la dirección de tensión a través de la línea central del conjunto de agarre. En el caso de las mordazas autoalineables, se unen a los soportes fijos y móviles de la máquina de ensayo, de tal manera que se moverán libremente de forma alineada en el eje largo de la probeta, lo cual coincide con la dirección de la tensión aplicada a través de la línea central del conjunto de agarre. Es importante alinear para evitar el deslizamiento en las empuñaduras. Las estrías del mecanismo de agarre se deben encontrar limpias y afiladas.
- Mecanismo de transmisión: es un mecanismo para transmitir una velocidad uniforme y controlada, del miembro móvil, con respecto al miembro estacionario.

- Indicador de carga: es un mecanismo que indica la carga de tensión total soportada por la muestra de prueba cuando está sujeta por las empuñaduras. El mecanismo debe estar libre de retardo de inercia.
- Indicador de extensión (extensómetro): se debe utilizar un instrumento para determinar la extensión de la muestra de prueba, el cual se ajuste a la longitud total de la muestra de prueba, como se muestra en la figura 14. Es recomendable que el instrumento registre de manera automática la distancia de extensión o cualquier cambio al respecto de la extensión, en función de la carga sobre la probeta en relación al tiempo transcurrido durante la prueba. Este instrumento debe encontrarse libre de retardo de inercia a la velocidad especificada de las pruebas.
- Mediciones del módulo de elasticidad: se podrán realizar mediante un extensómetro con error de deformación de 0.0002 mm/mm, que registrará de forma continua.
- Mediciones de baja extensión: para mediciones de alargamiento de baja extensión (nominalmente 20% o menos), el anterior extensómetro. Debe tener un error de deformación fijo de 0.001
- Micrómetro: es un instrumento para medir el ancho y espesor de la muestra.

#### Especímenes de prueba

Serán plásticos en láminas, placas y moldeados. Las muestras de ensayo, deben cumplir con las dimensiones de la figura 14.

- Preparación: incluye el moldeo por inyección, operaciones de mecanizado, troquelado, corte de materiales en hojas, losa o forma similar. Todas las superficies de la muestra deben estar libres de visibles defectos, rayones o imperfecciones. Las marcas dejadas por las operaciones de mecanizado, deben eliminarse cuidadosamente con una lima fina o abrasivo, y las superficies limadas se alisarán con papel abrasivo (No. 00 o más fino). Los golpes de lijado de acabado se realizarán en una dirección paralela al eje mayor del ensayo muestra. Todas las rebabas se eliminarán de una muestra moldeada, teniendo mucho cuidado de no alterar las superficies moldeadas. De requerir marcas de calibre en la prueba se realizarán mediante crayón de cera o tinta china, que no afecte el material de prueba. El material no debe ser rayado, perforado o impreso. Al probar materiales sospechosos de anisotropía, deben prepararse conjuntos duplicados de probetas, con sus ejes largos respectivamente paralelos y normales a la sospecha de dirección de anisotropía.

Número de especímenes:

Se analizarán al menos 5 especímenes para cada muestra en el caso de materiales isotrópicos. Para materiales anisotrópico se probarán 5 especímenes normales y 5 paralelos al eje principal de la anisotropía.

Se desecharán las muestras que se rompan por algún defecto o que la ruptura sea fuera de la sección de prueba transversal estrecha y realizar nuevas pruebas a menos que dichos defectos constituyan una variable a estudiar.

Velocidad de la prueba:

Será la velocidad relativa de las empuñaduras o accesorios de prueba, durante la prueba. La tasa de movimiento de la empuñadura impulsada o el accesorio cuando la máquina de prueba está funcionando no está especificada. Por tal motivo, se usará la velocidad más baja, para este tipo de probeta: 5 mm/min con tolerancia del  $\pm 25\%$  (1.25 mm/min). Lo que da una ruptura dentro de un tiempo de prueba de 0.5 a 5 minutos.

Acondicionamiento de la muestra:

Se acondicionarán a  $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$ , con humedad relativa del  $50\% \pm 2$  no menos de 40 hrs previas al ensayo

Procedimiento:

Medir ancho y grosor de cada muestra. Colocar la muestra en las empuñaduras de la máquina de prueba, teniendo cuidado de alinear el eje largo de la muestra y las empuñaduras con una línea imaginaria que une los puntos de unión del agarre a la máquina. Se aprieta la mordaza de forma uniforme y firmemente en el grado necesario para prevenir deslizamiento de la muestra durante la prueba, pero no al punto de triturarla. Colocar el indicador de extensión. Cuando el módulo está siendo determinado, se requiere un extensómetro clase B. El módulo de los materiales se determina a partir de la pendiente de la porción lineal de la curva tensión-deformación. El cambio en la separación de la mandíbula nunca debe usarse para calcular módulo o alargamiento. Se debe establecer la velocidad de 5 mm/min con tolerancia del  $\pm 25\%$  (1.25 mm/min) y encender la máquina. Registrar la curva de carga-extensión de la muestra, registrar la carga y la extensión en el punto de fluencia (sí hay alguno) y la carga y extensión en el momento de la ruptura.

Método de prueba estándar para la determinación del coeficiente lineal de expansión térmica de madera plástica y formas de madera plástica entre  $-30$  y  $140\text{ }^{\circ}\text{F}$  ( $-34,4$  y  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Basado en la norma ASTM D 6341-16

Materiales e instrumentos para prueba de temperatura baja:

- Charola de acero inoxidable de 50x50x15 cm
- Charola de Aluminio flexible de 30x45x15 cm
- Anticongelante con capacidad de resistir temperaturas menores a  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$

- Nitrógeno líquido, termómetro con capacidad de registrar temperaturas de hasta -30 °C

- Calibrador y pinzas

7.5.7.1 Materiales e instrumentos para prueba de temperatura alta:

- Caja de acrílico transparente con 6 focos cada uno de 60 W

- Potenciómetro graduado conectado a los 6 focos, que controla la intensidad del voltaje

- LVDT, base de Aluminio para LVDT

- Multímetro con capacidad para medir temperatura

- 2 termopares uno para el multímetro y otro para la computadora con programa LabView

Procedimiento:

Se fabricarán cinco probetas en una sección de 5 x 5 x 20 cm. Se debe medir las dimensiones de cada probeta a temperatura ambiente, así como marcar una línea horizontal a lo largo de la probeta, como se muestra en la figura 15.

La charola de Aluminio se coloca al interior de la charola de acero, después de deberá colocar el anticongelante en la charola de Aluminio y el Nitrógeno en la de acero. Este último se debe colocar de forma gradual y lenta, se mide de forma continua la temperatura con un termómetro de Mercurio hasta que el anticongelante alcance los - 30 °C. En este momento la probeta se sumerge en el anticongelante para someterla a la condición prevista. La prueba deberá tener una duración de 15 minutos, al concluir se retira la probeta y se realiza la medición de forma inmediata. Se concluye con el registro de los resultados conforme a los datos y puntos tomados para las anteriores pruebas.

Inmediatamente se colocará la probeta en la charola de Aluminio que se encuentra en la caja de acrílico con focos. Se calibrará el LVDT, es necesario verificar que la temperatura sea igual en ambos termopares. Posteriormente se enciende el potenciómetro (60% = 60 °C), hasta un 60 % de su capacidad y se registran los datos por medio del software LabView

Cálculo:

Pendiente de ajuste lineal:

$$m = \frac{3(\sum LiTi) - (\sum Li)(\sum Ti)}{3(\sum Ti^2) - (\sum Ti)^2}$$

- m = pendiente

- Li = largo de cada probeta

- Ti = temperatura de cada observación

Coefficiente de expansión térmica lineal:

$$a = (1/L_2) m$$

a = coeficiente de expansión térmica lineal a 21 °C

L<sub>2</sub> = largo de la probeta a la temperatura de 21 °C

m = pendiente

Se deben procesar los datos y obtener el promedio, así como la desviación. Con ese promedio se calcula la expansión térmica mediante la siguiente expresión:

$$\Delta L = L_0 (\alpha \Delta T)$$

$\Delta L$  = diferencial de longitud

$L_0$  = largo de la probeta a temperatura de 21 °C

$\alpha$  = coeficiente de expansión térmica lineal a 21 °C

$\Delta T$  = diferencial de temperatura

#### 7.4.7.4 Resultados esperados:

Los resultados esperados se encuentran como mínimos en base a los registrados por la madera plástica en promedio. Los resultados se presentan en la tabla 5

### Anexo 4. Ordenadas del espectro de respuesta, NTC sismo 2017

Para la obtención de las ordenadas del espectro de respuesta y su respectiva gráfica fueron introducidas as siguientes coordenadas 19.472451 en el programa prodisis: -99.198924,

T [s]	Sa [1/g]
0	0.103622
0.01	0.125465
0.02	0.147307
0.03	0.16915
0.04	0.190993
0.05	0.212836
0.06	0.234679
0.07	0.256521
0.08	0.278364
0.09	0.300207
0.1	0.32205
0.11	0.32205
0.12	0.32205
0.13	0.32205
0.14	0.32205
0.15	0.32205
0.16	0.32205
0.17	0.32205
0.18	0.32205
0.19	0.32205

0.2	0.32205
0.21	0.32205
0.22	0.32205
0.23	0.32205
0.24	0.32205
0.25	0.32205
0.26	0.32205
0.27	0.32205
0.28	0.32205
0.29	0.32205
0.3	0.32205
0.31	0.32205
0.32	0.32205
0.33	0.32205
0.34	0.32205
0.35	0.32205
0.36	0.32205
0.37	0.32205
0.38	0.32205
0.39	0.32205
0.4	0.32205
0.41	0.32205
0.42	0.32205
0.43	0.32205
0.44	0.32205
0.45	0.32205
0.46	0.32205
0.47	0.32205
0.48	0.32205
0.49	0.32205
0.5	0.32205
0.51	0.32205
0.52	0.32205
0.53	0.32205
0.54	0.32205
0.55	0.32205
0.56	0.32205
0.57	0.32205
0.58	0.32205
0.59	0.32205
0.6	0.32205
0.61	0.319399

0.62	0.316813
0.63	0.314289
0.64	0.311824
0.65	0.309416
0.66	0.307063
0.67	0.304762
0.68	0.302513
0.69	0.300313
0.7	0.29816
0.71	0.296053
0.72	0.29399
0.73	0.291969
0.74	0.28999
0.75	0.28805
0.76	0.286149
0.77	0.284285
0.78	0.282456
0.79	0.280663
0.8	0.278903
0.81	0.277176
0.82	0.275481
0.83	0.273817
0.84	0.272182
0.85	0.270576
0.86	0.268998
0.87	0.267448
0.88	0.265924
0.89	0.264426
0.9	0.262953
0.91	0.261504
0.92	0.260079
0.93	0.258677
0.94	0.257297
0.95	0.255939
0.96	0.254603
0.97	0.253287
0.98	0.251991
0.99	0.250716
1	0.249459
1.01	0.248221
1.02	0.247001
1.03	0.245799

1.04	0.244614
1.05	0.243447
1.06	0.242296
1.07	0.241161
1.08	0.240042
1.09	0.238938
1.1	0.23785
1.11	0.236776
1.12	0.235716
1.13	0.234671
1.14	0.23364
1.15	0.232622
1.16	0.231617
1.17	0.230625
1.18	0.229645
1.19	0.228679
1.2	0.227724
1.21	0.226781
1.22	0.225849
1.23	0.224929
1.24	0.224021
1.25	0.223123
1.26	0.222236
1.27	0.221359
1.28	0.220493
1.29	0.219636
1.3	0.21879
1.31	0.217953
1.32	0.217126
1.33	0.216308
1.34	0.2155
1.35	0.2147
1.36	0.213909
1.37	0.213127
1.38	0.212353
1.39	0.211588
1.4	0.210831
1.41	0.210082
1.42	0.209341
1.43	0.208608
1.44	0.207882
1.45	0.207164

1.46	0.206454
1.47	0.20575
1.48	0.205054
1.49	0.204365
1.5	0.203682
1.51	0.203007
1.52	0.202338
1.53	0.201675
1.54	0.20102
1.55	0.20037
1.56	0.199727
1.57	0.19909
1.58	0.198459
1.59	0.197834
1.6	0.197214
1.61	0.196601
1.62	0.195993
1.63	0.195391
1.64	0.194795
1.65	0.194203
1.66	0.193618
1.67	0.193037
1.68	0.192462
1.69	0.191891
1.7	0.191326
1.71	0.190766
1.72	0.190211
1.73	0.18966
1.74	0.189114
1.75	0.188573
1.76	0.188037
1.77	0.187505
1.78	0.186977
1.79	0.186454
1.8	0.185936
1.81	0.185421
1.82	0.184911
1.83	0.184405
1.84	0.183903
1.85	0.183406
1.86	0.182912
1.87	0.182422

1.88	0.181937
1.89	0.181455
1.9	0.180976
1.91	0.180502
1.92	0.180031
1.93	0.179564
1.94	0.179101
1.95	0.178641
1.96	0.178185
1.97	0.177732
1.98	0.177283
1.99	0.176837
2	0.176394
2.01	0.17551
2.02	0.174622
2.03	0.173731
2.04	0.172836
2.05	0.171939
2.06	0.171041
2.07	0.17014
2.08	0.169238
2.09	0.168335
2.1	0.167432
2.11	0.166528
2.12	0.165625
2.13	0.164722
2.14	0.163819
2.15	0.162917
2.16	0.162017
2.17	0.161118
2.18	0.16022
2.19	0.159324
2.2	0.158431
2.21	0.157539
2.22	0.15665
2.23	0.155763
2.24	0.15488
2.25	0.153999
2.26	0.153121
2.27	0.152246
2.28	0.151374
2.29	0.150506

2.3	0.149642
2.31	0.148781
2.32	0.147924
2.33	0.14707
2.34	0.146221
2.35	0.145376
2.36	0.144534
2.37	0.143697
2.38	0.142864
2.39	0.142035
2.4	0.14121
2.41	0.14039
2.42	0.139575
2.43	0.138763
2.44	0.137957
2.45	0.137155
2.46	0.136357
2.47	0.135564
2.48	0.134776
2.49	0.133992
2.5	0.133213
2.51	0.132438
2.52	0.131669
2.53	0.130904
2.54	0.130144
2.55	0.129388
2.56	0.128638
2.57	0.127892
2.58	0.127151
2.59	0.126414
2.6	0.125683
2.61	0.124956
2.62	0.124234
2.63	0.123516
2.64	0.122804
2.65	0.122096
2.66	0.121393
2.67	0.120694
2.68	0.12
2.69	0.119311
2.7	0.118627
2.71	0.117947

2.72	0.117272
2.73	0.116602
2.74	0.115936
2.75	0.115275
2.76	0.114618
2.77	0.113966
2.78	0.113319
2.79	0.112676
2.8	0.112037
2.81	0.111403
2.82	0.110773
2.83	0.110148
2.84	0.109527
2.85	0.108911
2.86	0.108299
2.87	0.107691
2.88	0.107088
2.89	0.106489
2.9	0.105894
2.91	0.105304
2.92	0.104717
2.93	0.104135
2.94	0.103557
2.95	0.102983
2.96	0.102413
2.97	0.101847
2.98	0.101286
2.99	0.100728
3	0.100174
3.01	0.099625
3.02	0.099079
3.03	0.098537
3.04	0.097999
3.05	0.097465
3.06	0.096935
3.07	0.096408
3.08	0.095886
3.09	0.095367
3.1	0.094851
3.11	0.09434
3.12	0.093832
3.13	0.093328

3.14	0.092827
3.15	0.09233
3.16	0.091837
3.17	0.091347
3.18	0.09086
3.19	0.090378
3.2	0.089898
3.21	0.089422
3.22	0.088949
3.23	0.08848
3.24	0.088014
3.25	0.087552
3.26	0.087092
3.27	0.086636
3.28	0.086184
3.29	0.085734
3.3	0.085288
3.31	0.084844
3.32	0.084404
3.33	0.083967
3.34	0.083534
3.35	0.083103
3.36	0.082675
3.37	0.08225
3.38	0.081829
3.39	0.08141
3.4	0.080994
3.41	0.080581
3.42	0.080171
3.43	0.079764
3.44	0.07936
3.45	0.078959
3.46	0.07856
3.47	0.078164
3.48	0.077771
3.49	0.077381
3.5	0.076993
3.51	0.076608
3.52	0.076226
3.53	0.075847
3.54	0.07547
3.55	0.075095

3.56	0.074724
3.57	0.074355
3.58	0.073988
3.59	0.073624
3.6	0.073262
3.61	0.072903
3.62	0.072547
3.63	0.072192
3.64	0.071841
3.65	0.071491
3.66	0.071144
3.67	0.0708
3.68	0.070457
3.69	0.070117
3.7	0.06978
3.71	0.069444
3.72	0.069111
3.73	0.068781
3.74	0.068452
3.75	0.068126
3.76	0.067801
3.77	0.067479
3.78	0.06716
3.79	0.066842
3.8	0.066526
3.81	0.066213
3.82	0.065901
3.83	0.065592
3.84	0.065285
3.85	0.06498
3.86	0.064676
3.87	0.064375
3.88	0.064076
3.89	0.063779
3.9	0.063484
3.91	0.06319
3.92	0.062899
3.93	0.062609
3.94	0.062322
3.95	0.062036
3.96	0.061752
3.97	0.06147

3.98	0.06119
3.99	0.060912
4	0.060635
4.01	0.060361
4.02	0.060088
4.03	0.059817
4.04	0.059547
4.05	0.059279
4.06	0.059013
4.07	0.058749
4.08	0.058487
4.09	0.058226
4.1	0.057967
4.11	0.057709
4.12	0.057453
4.13	0.057199
4.14	0.056946
4.15	0.056695
4.16	0.056445
4.17	0.056197
4.18	0.055951
4.19	0.055706
4.2	0.055463
4.21	0.055221
4.22	0.054981
4.23	0.054742
4.24	0.054505
4.25	0.054269
4.26	0.054035
4.27	0.053802
4.28	0.053571
4.29	0.053341
4.3	0.053112
4.31	0.052885
4.32	0.052659
4.33	0.052435
4.34	0.052212
4.35	0.05199
4.36	0.05177
4.37	0.051551
4.38	0.051334
4.39	0.051117

4.4	0.050903
4.41	0.050689
4.42	0.050477
4.43	0.050266
4.44	0.050056
4.45	0.049847
4.46	0.04964
4.47	0.049434
4.48	0.049229
4.49	0.049026
4.5	0.048824
4.51	0.048622
4.52	0.048423
4.53	0.048224
4.54	0.048026
4.55	0.04783
4.56	0.047635
4.57	0.047441
4.58	0.047248
4.59	0.047056
4.6	0.046866
4.61	0.046676
4.62	0.046488
4.63	0.0463
4.64	0.046114
4.65	0.045929
4.66	0.045745
4.67	0.045562
4.68	0.04538
4.69	0.045199
4.7	0.04502
4.71	0.044841
4.72	0.044663
4.73	0.044486
4.74	0.044311
4.75	0.044136
4.76	0.043962
4.77	0.04379
4.78	0.043618
4.79	0.043447
4.8	0.043278
4.81	0.043109

4.82	0.042941
4.83	0.042774
4.84	0.042608
4.85	0.042443
4.86	0.042279
4.87	0.042116
4.88	0.041954
4.89	0.041793
4.9	0.041632
4.91	0.041473
4.92	0.041314
4.93	0.041156
4.94	0.041
4.95	0.040844
4.96	0.040689
4.97	0.040534
4.98	0.040381
4.99	0.040228
5	0.040077
5.01	0.039926
5.02	0.039776
5.03	0.039627
5.04	0.039478
5.05	0.039331
5.06	0.039184
5.07	0.039038
5.08	0.038893
5.09	0.038748
5.1	0.038605
5.11	0.038462
5.12	0.03832
5.13	0.038179
5.14	0.038038
5.15	0.037898
5.16	0.037759
5.17	0.037621
5.18	0.037484
5.19	0.037347
5.2	0.037211
5.21	0.037075
5.22	0.036941
5.23	0.036807

5.24	0.036674
5.25	0.036541
5.26	0.036409
5.27	0.036278
5.28	0.036148
5.29	0.036018
5.3	0.035889
5.31	0.035761
5.32	0.035633
5.33	0.035506
5.34	0.03538
5.35	0.035254
5.36	0.035129
5.37	0.035005
5.38	0.034881
5.39	0.034758
5.4	0.034635
5.41	0.034514
5.42	0.034392
5.43	0.034272
5.44	0.034152
5.45	0.034033
5.46	0.033914
5.47	0.033796
5.48	0.033678
5.49	0.033561
5.5	0.033445
5.51	0.033329
5.52	0.033214
5.53	0.0331
5.54	0.032986
5.55	0.032872
5.56	0.03276
5.57	0.032647
5.58	0.032536
5.59	0.032425
5.6	0.032314
5.61	0.032204
5.62	0.032094
5.63	0.031986
5.64	0.031877
5.65	0.031769

5.66	0.031662
5.67	0.031555
5.68	0.031449
5.69	0.031343
5.7	0.031238
5.71	0.031134
5.72	0.031029
5.73	0.030926
5.74	0.030823
5.75	0.03072
5.76	0.030618
5.77	0.030516
5.78	0.030415
5.79	0.030315
5.8	0.030214
5.81	0.030115
5.82	0.030016
5.83	0.029917
5.84	0.029819
5.85	0.029721
5.86	0.029624
5.87	0.029527
5.88	0.029431
5.89	0.029335
5.9	0.029239
5.91	0.029145
5.92	0.02905
5.93	0.028956
5.94	0.028862
5.95	0.028769
5.96	0.028677
5.97	0.028584
5.98	0.028492
5.99	0.028401
6	0.02831
6.01	0.02822
6.02	0.02813
6.03	0.02804
6.04	0.027951
6.05	0.027862
6.06	0.027773
6.07	0.027685

6.08	0.027598
6.09	0.027511
6.1	0.027424
6.11	0.027337
6.12	0.027251
6.13	0.027166
6.14	0.027081
6.15	0.026996
6.16	0.026912
6.17	0.026828
6.18	0.026744
6.19	0.026661
6.2	0.026578
6.21	0.026495
6.22	0.026413
6.23	0.026332
6.24	0.02625
6.25	0.026169
6.26	0.026089
6.27	0.026008
6.28	0.025929
6.29	0.025849
6.3	0.02577
6.31	0.025691
6.32	0.025613
6.33	0.025535
6.34	0.025457
6.35	0.02538
6.36	0.025303
6.37	0.025226
6.38	0.02515
6.39	0.025074
6.4	0.024998
6.41	0.024923
6.42	0.024848
6.43	0.024773
6.44	0.024699
6.45	0.024625
6.46	0.024551
6.47	0.024478
6.48	0.024405
6.49	0.024332

6.5	0.02426
6.51	0.024187
6.52	0.024116
6.53	0.024044
6.54	0.023973
6.55	0.023902
6.56	0.023832
6.57	0.023762
6.58	0.023692
6.59	0.023622
6.6	0.023553
6.61	0.023484
6.62	0.023415
6.63	0.023347
6.64	0.023279
6.65	0.023211
6.66	0.023144
6.67	0.023076
6.68	0.02301
6.69	0.022943
6.7	0.022877
6.71	0.02281
6.72	0.022745
6.73	0.022679
6.74	0.022614
6.75	0.022549
6.76	0.022484
6.77	0.02242
6.78	0.022356
6.79	0.022292
6.8	0.022229
6.81	0.022165
6.82	0.022102
6.83	0.022039
6.84	0.021977
6.85	0.021915
6.86	0.021853
6.87	0.021791
6.88	0.021729
6.89	0.021668
6.9	0.021607
6.91	0.021547

6.92	0.021486
6.93	0.021426
6.94	0.021366
6.95	0.021306
6.96	0.021247
6.97	0.021188
6.98	0.021129
6.99	0.02107
7	0.021012
7.01	0.020953
7.02	0.020895
7.03	0.020838
7.04	0.02078
7.05	0.020723
7.06	0.020666
7.07	0.020609
7.08	0.020552
7.09	0.020496
7.1	0.02044
7.11	0.020384
7.12	0.020328
7.13	0.020273
7.14	0.020218
7.15	0.020163
7.16	0.020108
7.17	0.020053
7.18	0.019999
7.19	0.019945
7.2	0.019891
7.21	0.019837
7.22	0.019784
7.23	0.01973
7.24	0.019677
7.25	0.019625
7.26	0.019572
7.27	0.01952
7.28	0.019467
7.29	0.019415
7.3	0.019364
7.31	0.019312
7.32	0.019261
7.33	0.019209

7.34	0.019158
7.35	0.019108
7.36	0.019057
7.37	0.019007
7.38	0.018957
7.39	0.018907
7.4	0.018857
7.41	0.018807
7.42	0.018758
7.43	0.018709
7.44	0.01866
7.45	0.018611
7.46	0.018562
7.47	0.018514
7.48	0.018465
7.49	0.018417
7.5	0.018369
7.51	0.018322
7.52	0.018274
7.53	0.018227
7.54	0.01818
7.55	0.018133
7.56	0.018086
7.57	0.018039
7.58	0.017993
7.59	0.017947
7.6	0.0179
7.61	0.017855
7.62	0.017809
7.63	0.017763
7.64	0.017718
7.65	0.017673
7.66	0.017628
7.67	0.017583
7.68	0.017538
7.69	0.017494
7.7	0.017449
7.71	0.017405
7.72	0.017361
7.73	0.017317
7.74	0.017273
7.75	0.01723

7.76	0.017187
7.77	0.017143
7.78	0.0171
7.79	0.017057
7.8	0.017015
7.81	0.016972
7.82	0.01693
7.83	0.016887
7.84	0.016845
7.85	0.016803
7.86	0.016762
7.87	0.01672
7.88	0.016678
7.89	0.016637
7.9	0.016596
7.91	0.016555
7.92	0.016514
7.93	0.016473
7.94	0.016433
7.95	0.016392
7.96	0.016352
7.97	0.016312
7.98	0.016272
7.99	0.016232
8	0.016192
8.01	0.016153
8.02	0.016113
8.03	0.016074
8.04	0.016035
8.05	0.015996
8.06	0.015957
8.07	0.015919
8.08	0.01588
8.09	0.015842
8.1	0.015803
8.11	0.015765
8.12	0.015727
8.13	0.015689
8.14	0.015652
8.15	0.015614
8.16	0.015577
8.17	0.015539

8.18	0.015502
8.19	0.015465
8.2	0.015428
8.21	0.015391
8.22	0.015355
8.23	0.015318
8.24	0.015282
8.25	0.015245
8.26	0.015209
8.27	0.015173
8.28	0.015137
8.29	0.015101
8.3	0.015066
8.31	0.01503
8.32	0.014995
8.33	0.01496
8.34	0.014924
8.35	0.014889
8.36	0.014854
8.37	0.01482
8.38	0.014785
8.39	0.01475
8.4	0.014716
8.41	0.014682
8.42	0.014648
8.43	0.014613
8.44	0.01458
8.45	0.014546
8.46	0.014512
8.47	0.014478
8.48	0.014445
8.49	0.014412
8.5	0.014378
8.51	0.014345
8.52	0.014312
8.53	0.014279
8.54	0.014246
8.55	0.014214
8.56	0.014181
8.57	0.014149
8.58	0.014116
8.59	0.014084

8.6	0.014052
8.61	0.01402
8.62	0.013988
8.63	0.013956
8.64	0.013925
8.65	0.013893
8.66	0.013861
8.67	0.01383
8.68	0.013799
8.69	0.013768
8.7	0.013737
8.71	0.013706
8.72	0.013675
8.73	0.013644
8.74	0.013613
8.75	0.013583
8.76	0.013552
8.77	0.013522
8.78	0.013492
8.79	0.013462
8.8	0.013432
8.81	0.013402
8.82	0.013372
8.83	0.013342
8.84	0.013312
8.85	0.013283
8.86	0.013253
8.87	0.013224
8.88	0.013195
8.89	0.013166
8.9	0.013137
8.91	0.013108
8.92	0.013079
8.93	0.01305
8.94	0.013021
8.95	0.012993
8.96	0.012964
8.97	0.012936
8.98	0.012907
8.99	0.012879
9	0.012851
9.01	0.012823

9.02	0.012795
9.03	0.012767
9.04	0.01274
9.05	0.012712
9.06	0.012684
9.07	0.012657
9.08	0.012629
9.09	0.012602
9.1	0.012575
9.11	0.012548
9.12	0.012521
9.13	0.012494
9.14	0.012467
9.15	0.01244
9.16	0.012413
9.17	0.012387
9.18	0.01236
9.19	0.012334
9.2	0.012307
9.21	0.012281
9.22	0.012255
9.23	0.012229
9.24	0.012203
9.25	0.012177
9.26	0.012151
9.27	0.012125
9.28	0.012099
9.29	0.012074
9.3	0.012048
9.31	0.012023
9.32	0.011997
9.33	0.011972
9.34	0.011947
9.35	0.011922
9.36	0.011897
9.37	0.011872
9.38	0.011847
9.39	0.011822
9.4	0.011797
9.41	0.011772
9.42	0.011748
9.43	0.011723

9.44	0.011699
9.45	0.011675
9.46	0.01165
9.47	0.011626
9.48	0.011602
9.49	0.011578
9.5	0.011554
9.51	0.01153
9.52	0.011506
9.53	0.011482
9.54	0.011459
9.55	0.011435
9.56	0.011411
9.57	0.011388
9.58	0.011364
9.59	0.011341
9.6	0.011318
9.61	0.011295
9.62	0.011272
9.63	0.011248
9.64	0.011225
9.65	0.011203
9.66	0.01118
9.67	0.011157
9.68	0.011134
9.69	0.011112
9.7	0.011089
9.71	0.011067
9.72	0.011044
9.73	0.011022
9.74	0.010999
9.75	0.010977
9.76	0.010955
9.77	0.010933
9.78	0.010911
9.79	0.010889
9.8	0.010867
9.81	0.010845
9.82	0.010823
9.83	0.010802
9.84	0.01078
9.85	0.010759

9.86	0.010737
9.87	0.010716
9.88	0.010694
9.89	0.010673
9.9	0.010652
9.91	0.01063
9.92	0.010609
9.93	0.010588
9.94	0.010567
9.95	0.010546
9.96	0.010525
9.97	0.010505
9.98	0.010484
9.99	0.010463
10	0.010443

Polietileno de alta densidad reciclado reforzado por fibra de vidrio.  
Aplicación estructural en la arquitectura.