



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA
TECNOLOGÍA

MADERA PLÁSTICA DE PEAD (POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD)
RECICLADO COMO MATERIAL ESTRUCTURAL

TESIS

QUE PARA OPTAR EL GRADO DE:
MAESTRÍA EN ARQUITECTURA

PRESENTA:

LIC. EN ARQ. OSCAR MESÍAS SALCEDO CORTÉS

DIRECTOR DE TESIS

MTRA. ING. PERLA RAFAEL SANTA ANA LOZADA
FACULTAD DE ARQUITECTURA
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA

SINODALES

DR. MIKHAIL ZOLOTUKIN

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES
DEPARTAMENTO DE POLÍMEROS

DR. ALBERTO MUCIÑO VÉLEZ

FACULTAD DE ARQUITECTURA
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y PAISAJE

MTRO. EN ARQ. JORGE RANGEL DÁVALOS

FACULTAD DE ARQUITECTURA
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA

MTRO. EN ARQ. LEONARDO ZEEVAERT ALCANTARA

FACULTAD DE ARQUITECTURA
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA

MEXICO, D.F. A NOVIEMBRE 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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 toda mi familia y amigos, en especial a mi madre, a mi padre y a mis hermanos, porque sin ellos yo no estuviera aquí.

A mis maestros, que me guiaron y me brindaron recursos técnicos para llevar a cabo mis ideas sobre la investigación, en especial mi tutora, que me apoyó en todos los sentidos.

A la UNAM que me aceptó en el posgrado de Arquitectura y al CONACYT por apoyarme con recursos económicos.

Índice

Resumen	1
Introducción	2
1. El problema de la basura	5
1.1. Estadísticas	5
1.2. Consecuencias	7
1.3. Tratamiento	7
1.4. Reciclado de residuos plásticos	8
1.5. El plástico reciclado en la arquitectura	11
1.5.1. Botellas como tabiques	11
1.5.2. Plástico en hojuela como agregado grueso	12
1.5.3. Plástico en hojuela prensado	13
1.5.4. Plástico retransformado	13
1.6. PEAD virgen aplicado en la construcción	17
1.7. Conclusiones del Análisis de ciclo de vida (ACV) de 1000 botellas PEAD	18
1.8. Conclusión	20
2. Madera Plástica de PEAD Reciclado (MPPR)	21
2.1. Desarrollo de la madera plástica	21
2.2. Polietileno de Alta Densidad (PEAD)	24
2.2.1. Propiedades térmicas	25
2.2.2. Cristalinidad	26
2.2.3. Propiedades mecánicas	28
2.2.4. Aditivos	30
2.2.5. Métodos de procesamiento	31
2.2.6. Métodos de conexión	35
2.3. Propiedades de la MPPR	35
2.3.1. Propiedades mecánicas	35
2.3.2. Aditivos	43
2.3.3. Métodos de procesamiento	44
2.3.4. Métodos de conexión	44
2.3.5. Aplicaciones	48
3. Propiedades de la MPPR de la empresa mexicana	50
3.1. Introducción	50
3.2. Prueba de compresión	51
3.2.1. Procedimiento	51
3.2.2. Resultados	54
3.2.3. Conclusiones	56

3.3. Prueba de tensión	57
3.3.1. Procedimiento	57
3.3.2. Resultados	59
3.3.3. Conclusiones	61
3.4. Prueba de flexión	62
3.4.1. Procedimiento	62
3.4.2. Resultados	65
3.4.3. Conclusiones	68
3.5. Prueba del coeficiente de expansión térmica lineal	69
3.5.1. Procedimiento	69
3.5.2. Resultados	73
3.5.3. Conclusiones	74
3.6. Prueba de gravedad específica (peso volumétrico)	75
3.6.1. Procedimiento	75
3.6.2. Resultados	76
3.6.3. Conclusiones	76
3.7. Comportamiento del material con base a sus propiedades mecánicas	77
4. Aplicación teórica de la MPPR de la empresa mexicana en un sistema arquitectónico-estructural	82
4.1. Proyecto teórico de aplicación	82
4.1.1. Geometría	83
4.1.2. Propuesta de conexiones y bases	85
4.2. Esfuerzos permisible de la MPPR de la empresa mexicana	88
4.2.1. Esfuerzos permisibles	88
4.2.2. Comportamiento teórico a diferentes temperaturas (Ct)	89
4.2.3. Comportamiento teórico a 10 años (β)	91
4.2.4. Análisis de cargas	100
4.3. Evaluación del modelo digital	101
4.3.1. Análisis del sistema	101
4.3.2. Evaluación	102
5. Conclusión	107
Bibliografía consultada	113
Gráficas	118
Ilustraciones	119
Tablas	120

Resumen

El incremento de los residuos plásticos en los vertederos de México es un problema importante que se debe enfrentar. Hoy en día se desarrollan alternativas que lo hacen en la arquitectura y la madera plástica pertenece a una de ellas.

La presente investigación define el comportamiento mecánico de la madera plástica de PEAD (Polietileno de Alta Densidad) reciclado fabricada por una empresa mexicana por medio del cual se propone un sistema estructural que acentúa las cualidades del material. Para ello se analizaron las propiedades del PEAD, así como el diseño de pruebas mecánicas con base en las normas ASTM; se calcularon los esfuerzos permisibles con el método de la ASTM y se analizó matemáticamente una estructura teórica para comprobar su estabilidad.

El análisis de los resultados establece que la madera plástica de PEAD reciclado no se debe considerar como madera natural porque tiene propiedades y comportamiento mecánico diferentes. El material mantiene el comportamiento mecánico del PEAD, es decir, un termoplástico, ya que su resistencia mecánica cambia bajo diferentes temperaturas. La madera plástica es más estable cuando se somete a esfuerzos de compresión. La geometría que trabaja mejor los esfuerzos a compresión es el arco anti-funicular y por ello se analiza el material en un sistema estructural con dicha geometría. Se obtiene como conclusión que la madera plástica de PEAD reciclado fabricada por la empresa mexicana es capaz de trabajar como material estructural si se toman en cuenta las recomendaciones establecidas en el presente documento.

El analizar y conocer por medio de esta investigación el comportamiento de la madera plástica que se produce en México permite a los arquitectos aumentar las posibilidades de diseño, en aspectos como textura, color, forma, rendimiento e incluso economía; al mismo tiempo brinda confianza a los constructores para incluirla en sus edificaciones. Además, al considerar el valor agregado que le proporciona el reciclado de plásticos para la elaboración de la madera plástica, no solo aumenta las posibilidades de diseño sino que también apoya a la reducción de desechos plásticos en los vertederos.

Introducción

La Madera Plástica de PEAD reciclado (MPPR) es un producto polimérico fabricado a partir del material plástico de desecho, en este caso de Polietileno de Alta Densidad. Ayuda a reducir la cantidad de basura plástica que aumenta día a día, sin embargo en México el material aún no es conocido cabalmente, por esa razón no genera un apoyo importante en la reducción de residuos plásticos.

De acuerdo a los datos que se pueden encontrar en los recursos web de la SEMARNAT, el crecimiento no tiene ningún tipo de control. Año con año aumenta la cantidad de desechos que se acumulan en los vertederos provocando daños a los ecosistemas donde se encuentran.

La preocupación sobre ellos ha crecido, por ello a nivel internacional, se ha trabajado para dar soluciones al problema a través de diferentes aplicaciones, una de ellos es en la arquitectura. En esta actividad humana es posible reciclar mayor cantidad de material por los volúmenes que se necesitan para construir cualquier espacio habitable, en comparación con otras aplicaciones como lo son el re-uso de botellas para mobiliario urbano o privado.

Entre todas las soluciones que podemos encontrar destaca la madera plástica, elaborada a partir de material plástico que se encuentra en los vertederos. Comúnmente se utiliza el PEAD reciclado como base, aunque hay productos que utilizan otros plásticos.

La madera plástica es un material polimérico que se intenta introducir al mercado mexicano de la construcción como sustituto de la madera natural pero con las ventajas inherentes que las propiedades de los plásticos le dan. Las principales ventajas son:

- No requiere un tratamiento especial para uso en los exteriores a diferencia de la madera que si no se trata pierde sus propiedades rápidamente.
- El mantenimiento es mínimo, solo limpieza por adherencias de suciedad en la superficie. La madera natural necesita renovar el tratamiento aplicado para mejorar mantener la protección a los agentes ambientales.
- No absorbe líquidos porque se considera un material hidrofóbico, por lo que el uso en condiciones de alta humedad no le afectan. La madera debe tener un grado de humedad preciso para no researse o hincharse.
- El acabado tiene una duración de 10 años garantizados por varias empresas fabricantes sin necesidad de retoques. La madera necesita renovar el acabado para mantenerlo por más tiempo.

En la investigación de (Reyes Vigil Montaña, Pastoriza Martínez, & Fernández de Piérola, 2002) se explican las ventajas que se presentan en el párrafo anterior y además resaltan la capacidad de los polímeros de ser procesados fácilmente en cualquier forma que se requiera en el proyecto, incluso si la forma no coincide con lo que se necesita en la obra, el material puede ser modificado con herramientas que se utilizan en sitio con facilidad.

La madera plástica se fabrica en México por medio de varios productores del material con diferentes tecnologías. En la tesis de (Schwanse, 2007) se describen dichas empresas que se dedican a ello. También habla de los procesos que utilizan para recolectar la materia prima, es decir el material de desecho. Esta información se considera para la investigación.

En el estudio realizado por (G. Lampo & J. Nosker, 1997) sobre las capacidades estructurales de la madera plástica se analiza, entre otras cosas, el diseño y construcción de un puente peatonal hecho con madera plástica reforzada con fibra de vidrio. El puente está diseñado para que la madera plástica reciba principalmente esfuerzos de compresión para que mantenga la estabilidad, sin embargo se perdió porque el material fallo debido a la rigidez que alcanzó el material por el refuerzo de fibras de vidrio, por lo tanto recomiendan utilizar madera plástica sin refuerzo para evitar fracturas o mejorar el material para que permita deformación sin falla.

Unos años después (McLaren Engineering Group, 2003) realizan la construcción de otro puente, también con madera plástica reforzada con fibra de vidrio, pero con mayor exigencia de cargas, ya que este puente se tiene que utilizar para el paso de vehículos de carga. Ellos utilizaron la información obtenida en la investigación de (G. Lampo & J. Nosker, 1997) para diseñar un nuevo puente donde se busca que el material reciba sólo esfuerzos a compresión. El resultado fue un éxito y el puente sigue en pie.

A partir de la preocupación por mejorar el medio ambiente de México por medio de la madera plástica y las investigaciones de (G. Lampo & J. Nosker, 1997) y (McLaren Engineering Group, 2003) que representan un esfuerzo significativo por incluir a la madera plástica como una opción de material estructural para aplicaciones específicas, se decide continuar con dicho esfuerzo, pero en la arquitectura mexicana, por aumentar las aplicaciones actuales de la madera plástica que se fabrica en nuestro país con el fin de dar confianza a los arquitectos e ingenieros para utilizar este material.

Con base a la información obtenida se llega a la hipótesis de que la madera plástica de PEAD reciclado elaborada en México puede ser considerada como material portante en la arquitectura mediante el desarrollo de un sistema estructural que potencialice sus propiedades mecánicas.

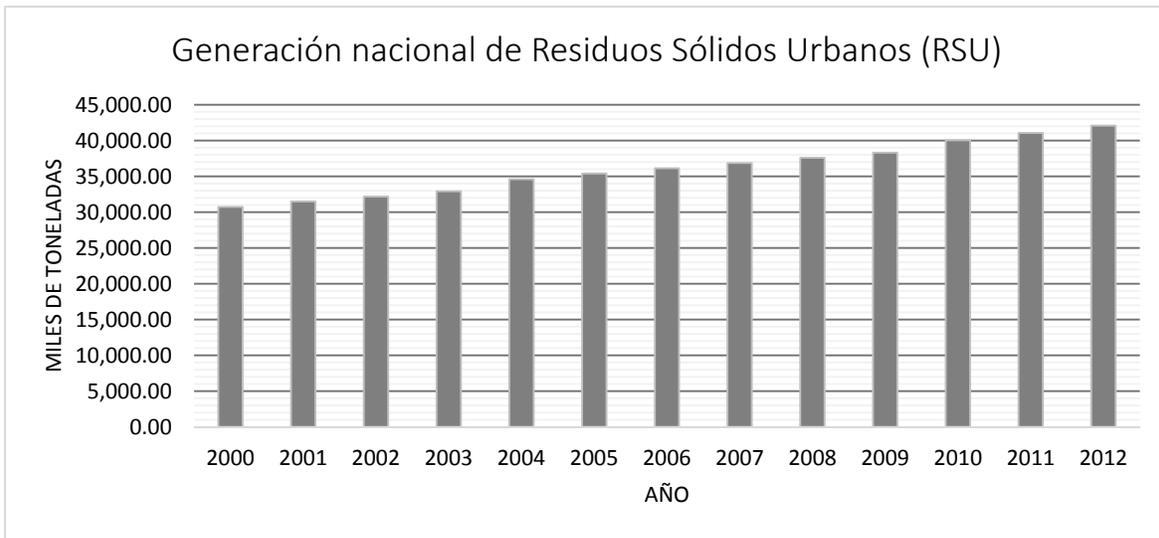
Con el objetivo de aplicar la madera plástica que se fabrica en México como material estructural en la arquitectura se propone: realizar pruebas mecánicas a la madera plástica que se estudia siguiendo la normatividad que establece la ASTM International para este tipo de materiales; analizar los resultados y definir los cargas que mejor soporta el material; a partir de esta información diseñar un sistema estructural para una aplicación en la arquitectura que utilice las propiedades de la madera plástica como una ventaja; analizar matemáticamente el comportamiento del material dentro de la estructura con ayuda del software SAP2000; y obtener conclusiones del sistema donde se incluyan recomendaciones del uso y nuevas perspectivas de investigación.

En resumen, la presente investigación busca comprender el comportamiento mecánico de la madera plástica de PEAD reciclado mediante los datos encontrados con el fin de promover la utilización creativa de dicho material para aumentar el número de aplicaciones con las que cuenta y provocar interés por los plásticos reciclados en la construcción. Por consiguiente incrementar la demanda de la madera plástica de PEAD reciclado para disminuir la cantidad de desechos de este último, y al mismo tiempo reducir el impacto ambiental que los plásticos producen.

1. El problema de la basura

1.1. Estadísticas

La cantidad de residuos que produce la sociedad mexicana está creciendo de manera preocupante. Si se analizan los números que proporciona la página web de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), es posible identificar este problema con mayor precisión.



Gráfica 1: Generación nacional de residuos sólidos urbanos (RSU)
(SEMARNAT, 2013)

En el año 2000, en todo el país se produjeron un total de 30,733,260 toneladas de basura (SEMARNAT, 2013). A través de los años, el crecimiento de la población y la mentalidad consumista de la sociedad provocó un aumento de los residuos alcanzando para el 2012 un total de 42,102,750 toneladas (SEMARNAT, 2013). Por lo tanto, la cantidad de basura se ha incrementado aproximadamente a razón de mil toneladas por año, sin ningún cambio positivo con respecto a la reducción de ésta.

Ahora bien, los Residuos Sólidos Urbanos “son los generados en las casas, como resultado de la eliminación de los materiales que se utilizan en las actividades domésticas; son también los que provienen de establecimientos o la vía pública, o los que resultan de la limpieza de las vías o lugares públicos y que tienen características como los domiciliarios [...]” (SEMARNAT, 2013). Por lo tanto pertenecen a este grupo varios tipos de desperdicios, los cuales la secretaría los clasifica en:

- Papel, cartón, productos de papel
- Textiles
- Plásticos
- Vidrios
- Metales
- Basura de comida, de jardines y materiales orgánicos similares
- Otro tipo de basura (residuos finos, pañal desechable, etc.)



Gráfica 2: Residuos sólidos urbanos por tipo 2012
(SEMARNAT, 2013)

Como puede corroborarse en la gráfica anterior, los dos tipos de residuos con mayor presencia en los vertederos son los materiales orgánicos y el papel, los cuales no representan un problema por la capacidad que tienen éstos de degradarse por medios naturales. En cambio, el tipo que se encuentra en cuarto lugar, es decir, el plástico; no se degrada en el medio ambiente a la velocidad que lo hacen los residuos orgánicos y el papel. Por lo tanto, este tipo de materiales se acumula en grandes cantidades (Colomer Mendoza & Gallardo Izquierdo, 2010).

De acuerdo al estudio realizado por (Condo Ortiz, 2012), el plástico más consumido en nuestro país es el Polipropileno (PP), con un 21% del total, seguido por el Polietileno de alta densidad (PEAD), con 16%. El Tereftalato de Polietileno (PET), el Polietileno de baja densidad (PEBD), el Polietileno lineal de baja densidad (PELBD), el Cloruro de Polivinilo (PVC) y el Poliestireno (PS), son los plásticos que le siguen en la lista.

1.2. Consecuencias

Las consecuencias que provoca la acumulación de residuos son variadas, que van desde la generación de malos olores, contaminación del aire, suelo y aguas tanto subterráneas como superficiales, hasta la degradación total del ecosistema donde se ubican (Cabildo Miranda, et al., 2008).

El estudio de (Colomer Mendoza & Gallardo Izquierdo, 2010, p. 44) resalta como principales problemas ocasionados por la mala gestión de los residuos sólidos lo siguiente:

1. Contaminación del medio (agua, suelo y aire) dentro del cual se produce:
2. Contaminación biótica del agua (patógenos)
3. Contaminación química del agua
4. Contaminación de suelos (basuras depositadas)
5. Producción de olores (materia orgánica en descomposición)
6. Contaminación atmosférica por emisiones gaseosas producidas por fermentación anaerobia (metano).
7. Proliferación de vectores.

Con base en lo anterior se concluye que se requiere actuar para disminuir la cantidad de residuos sólidos. La preocupación por ello ha ido aumentando en los últimos años, lo suficiente para que se estén buscando continuamente nuevas líneas de investigación en la comunidad científica (Colomer Mendoza & Gallardo Izquierdo, 2010).

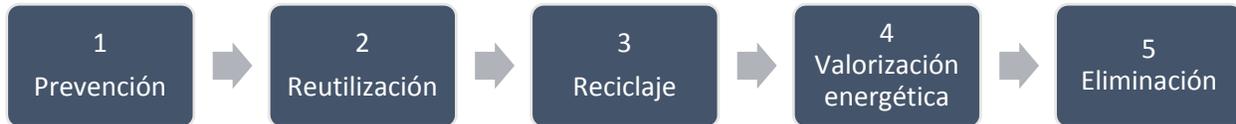
1.3. Tratamiento

Sobre el tratamiento de los Residuos Sólidos Urbanos se han realizado esfuerzos a nivel internacional como lo es el Programa 21, también conocido como Agenda 21, el cual es un plan exhaustivo que intenta generar “desarrollo que satisfaga las necesidades del presente sin poner en peligro la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades” (Organización de las Naciones Unidas, 1992). Este plan debe aplicarse en todos los niveles donde el ser humano tenga incidencia.

El capítulo 21 del mencionado documento trata, precisamente, de los residuos sólidos, y tiene como objetivos: a) reducción al mínimo de los desechos; b) Aumente al máximo la reutilización y el reciclado ecológicamente racionales de los desechos; c) Promoción de la eliminación y el tratamiento ecológicamente racionales de los desechos; d) Ampliación del alcance de los

servicios que se ocupan de los desechos. En resumen, de aquí se extrae la regla de las 3 R's, reducir, reusar y reciclar (Organización de las Naciones Unidas, 1992).

Otro intento por desarrollar un plan de tratamiento de estos residuos es el aprobado por el Consejo de Ministros de la UE (Unión Europea), que trata sobre el principio de jerarquía. El siguiente gráfico representa los niveles:



*Ilustración 1: Jerarquía del tratamiento de residuos propuesta por la UE
Elaboración propia con datos de (Cabildo Miranda, et al., 2008, p. 36)*

Este principio consiste en tratar los residuos priorizando los primeros niveles y tratando de evitar el último. El salto de niveles solo está permitido en el caso de que existan pruebas contundentes de que sea más eficiente un nivel que el otro en el tratamiento específico de un residuo.

A continuación se explican cada uno de los niveles:

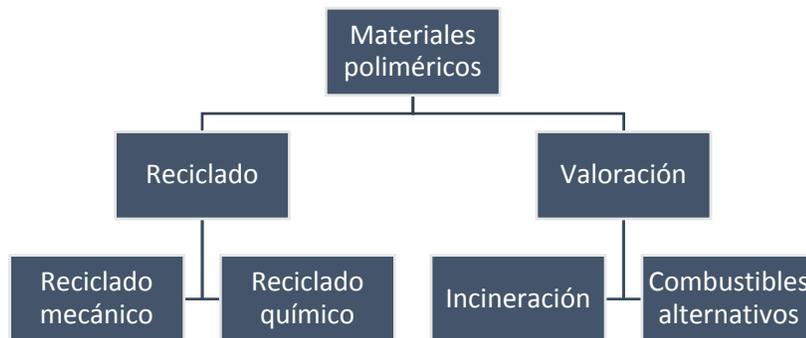
1. Prevención. Reducción de los residuos sólidos tanto cuantitativamente (cantidad o volumen), como cualitativamente (menos tóxicos o más reciclables).
2. Reutilización. Consiste en la utilización reiterada de un objeto o sustancia para evitar que sea un desperdicio.
3. Reciclaje. Se refiere al aprovechamiento de los residuos para darles un uso diferente del primero. Existe tecnologías de reciclaje muy variadas.
4. Valorización energética. Obtención de energía mediante poder calorífico. La energía obtenida debe ser mucho mayor a la utilizada para su transformación.
5. Eliminación. Es la opción menos ecológica y solo es aplicable a menos que no exista otro medio. Trata del vertido de los residuos, como es el caso de los residuos peligrosos, que se depositan en depósitos de seguridad o vertederos.

1.4. Reciclado de residuos plásticos

Los plásticos, hoy en día, ocupan un lugar muy importante en la vida cotidiana. Su uso masivo se debe a la variedad de propiedades que pueden adquirir, de las cuales destaca la posibilidad de ser fabricados ajustando sus características al uso que el producto demande (Cabildo Miranda, et al., 2008, p. 285).

El impacto nocivo que provocan los plásticos es significativamente menor que el ocasionado por otros residuos, porque su fabricación requiere menos recursos, es ligero y es resistente al medio ambiente. Además, es viable su reciclado (Colomer Mendoza & Gallardo Izquierdo, 2010, pp. 179-180).

El reciclado de plásticos es una acción que se recomienda sobre la incineración, ya que es menor la energía que se necesita para reciclarlos que para incinerarlos o producir nuevos. También se deben tomar en cuenta los tipos de proceso del reciclado. Otro factor que influye en la decisión es conocer si el proceso es económicamente viable. La siguiente ilustración muestra el tratamiento de los residuos plásticos (Cabildo Miranda, et al., 2008), (Colomer Mendoza & Gallardo Izquierdo, 2010):



*Ilustración 2: Opción de manejo de los residuos plásticos
Elaboración propia con datos de (Cabildo Miranda, et al., 2008, p. 299)*

En el reciclaje de los plásticos se distinguen cuatro niveles (Colomer Mendoza & Gallardo Izquierdo, 2010, p. 181):

- I. Primario. Consiste, básicamente, en la trituración del material plástico procedente del proceso de fabricación del producto. Posterior a la trituración se mezcla con materia prima virgen y se producen los nuevos productos. A este proceso le llaman reciclaje mecánico. Es un proceso barato y rentable.
- II. Secundario. El residuo plástico procede de una pieza ya utilizada, por lo tanto el material es más heterogéneo y contaminado. Para reciclarlo se necesita separar, triturar, limpiar y convertir los plásticos en materia prima (reciclado mecánico). Debido a la degradación se deben incorporar a la mezcla aditivos especiales, en consecuencia el proceso resulta más complejo y costoso que el anterior, sin embargo existen tecnologías en desarrollo para abaratarlo.
- III. Terciario. Es el reciclado por medios químicos, para obtener de los residuos plásticos materia prima que se utiliza en el proceso de fabricación de los polímeros. Es muy costosa.
- IV. Cuaternario. El residuo se emplea como combustible, es decir recuperación de la energía.

Una herramienta útil que auxilia a la separación e identificación de los plásticos es el número de clasificación que ideó la Sociedad de la Industria del Plástico en 1988. Los símbolos consisten en un grupo de flechas que están de cierta manera encadenadas, las cuales representan el símbolo del reciclado, y el número en su interior representa el tipo de plástico, ordenados desde el más sencillo de reciclar #1 (PET), hasta el más complicado #7(otros) (O Ecotextiles, 2012).

Los materiales plásticos que se reciclan con mayor regularidad son el #1 (PET) y el #2 (PEAD). Lo cual indica su rentabilidad de reciclaje con respecto a otros plásticos.

Cabe mencionar que no son los únicos tipos de plástico que existen en el mercado, de hecho podemos encontrar alrededor de cientos de ellos.

IDENTIFICACIÓN DE POLIMEROS			
Simbolo	Abreviación inglés	Abreviación español	Nombre del polimero
	PETE o PET	PET	Tereftalato de polietileno, también conocido como poliester
	HDPE o PE-HD	PEAD	Polietileno de alta densidad
	PVC	PVC	Cloruro de polivinilo
	LDPE o PE-LD	PEBD	Polietileno de baja densidad
	PP	PP	Polipropileno
	PS	PS	Poliestireno
	Otro u O	Otros	Otros plasticos: incluye acrilico, policarbonato

*Tabla 1: Identificación de polimeros
 Elaboración propia con datos de (O Ecotextiles, 2012)*

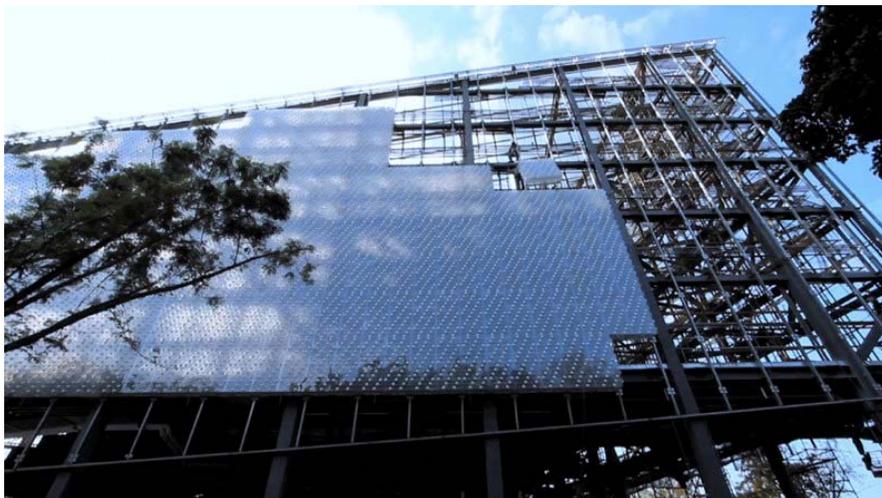
1.5. El plástico reciclado en la arquitectura

El plástico se ha incorporado a la industria de la construcción por sus propiedades únicas de manejabilidad y resistencia sobre otros materiales tradicionales, precisando, en aplicaciones específicas como recubrimientos, manguetería, casetones para losas aligeradas, entre otras. Es el más joven de los materiales que constituyen una edificación. Además, la creciente preocupación por el cuidado del planeta, ha impulsado a varios actores de la industria de la construcción y otras áreas a invertir esfuerzo, tiempo y recursos para lograr incluir el plástico más abundante en los vertederos a las edificaciones.

Para mejorar la comprensión sobre los proyectos que tratan de mejorar el medio ambiente utilizando el plástico que se encuentra en los vertederos a través de la Arquitectura es necesario dividirlos en cuatro grupos: botellas como tabiques, plástico en hojuela como agregado grueso, plástico en hojuela prensado y plástico retransformado.

1.5.1. Botellas como tabiques

El intento que realizó Ecoark¹ para disminuir la cantidad de residuos plásticos en la República de China, es digno de mencionar, por el tamaño del proyecto y la cantidad de PET translúcido que utilizó para elaborarlo. Construyó paneles con las botellas vacías, sujetadas una con la otra, por medio de marcos de acero. Estos paneles cubren la fachada, dándole una imagen distinta y muy agradable, además de los beneficios estéticos, también soportan contingencias naturales.



*Ilustración 3: Fachada del EcoArk Pavilion
(Buscador de arquitectura, 2011)*

¹ v. (Buscador de arquitectura, 2011)

El proyecto desarrollado por Emium² desprecia el plástico reciclado, sin embargo genera un envase que sin transformarlo, tiene la capacidad de ensamblarse para construir muros, es decir, puede ser utilizado como botella para bebidas o cualquier líquido y, al desecharse, solo se lava y genera un tabique. La ventaja principal del proyecto es la doble función del envase, reduciendo de esta manera, la cantidad de energía que se consume en la construcción.

Andreas Froese³ propone utilizar las botellas de PET para construir muros, supliendo el uso del tabique. La técnica es muy sencilla, consiste en llenar las botellas con arena, que puede extraerse del mismo terreno donde quedará emplazada la edificación, cerrarlas con su misma tapa, para que en seguida se apilen a manera de tabiques y se sujeten una con otra de la boquilla, por medio de algún hilo resistente. Al final, el muro construido puede ser aplanado tradicionalmente.

1.5.2. Plástico en hojuela como agregado grueso

El tabique de concreto ligero⁴ desarrollado en la Universidad Autónoma de Querétaro, por el Ing. Gerardo Soto Ramírez, es un ejemplo del esfuerzo que se ha hecho para disminuir los residuos plásticos que se encuentran en México. Este tabique está compuesto por cemento, fibras de PET y otros agregados; al tener PET, el tabique adquiere nuevas propiedades, como resistencia mayor que el tabique tradicional de barro o jalcreto, bajo esfuerzos flexionantes, incluso posee propiedades de durabilidad y ligereza. Este tabique con plástico reciclado se utiliza, principalmente, para construir muros de carga, pero la mezcla también puede ser aplicada en cerramientos que requieran baja resistencia.

El Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la República Argentina⁵ promovió la investigación dirigida por el Arq. Horacio Berretta, que trata de la sustitución de los agregados pétreos, en la elaboración de tabiques y cerramientos, por plásticos reciclados PEAD, PET y PEBD (Polietileno de baja densidad). Obtuvieron piezas menos resistentes a las tradicionales, sin embargo es suficiente para mantener en pie una casa de dos niveles. Además aventaja al tradicional en costo y peso.

² v. (Emium, 2010)

³ v. (Connect green, 2010)

⁴ v. (Buscador de arquitectura, 2012)

⁵ v. (Berretta, Aguello, Gatani, & Gaggino, 2013)

1.5.3. Plástico en hojuela prensado

Peter Lewis⁶ de Nueva Zelanda diseñó y fabricó una máquina que comprime y une hojuela de cualquier tipo de plástico reciclado para transformarlo en tabiques ensamblables. Se pueden aplanar, ajustando una malla de acero hexagonal a lo largo y ancho de la superficie que se requiera agregar el acabado.

1.5.4. Plástico retransformado

Ejemplos de ello los podemos encontrar alrededor del globo. En México tenemos algunos, como lo es el Panel prefabricado⁷, creado por Evangelina Díaz Cisneros y Guadalupe Araceli Martínez Carmona, egresadas del Centro de Estudios Científicos y Tecnológicos (Cecyt-11) “Wilfrido Massieu”. Este producto se utiliza como muro divisorio, y está fabricado con una mezcla de resinas, entre ellas el Tereftalato de Polietileno (PET). Resulta importante agregar que el panel cumple una doble función ecológica, al ser térmico, acústico y de alta durabilidad, además de provenir de residuos plásticos.

El tabique⁸ ensamblable del Ing. Mariano Núñez es un gran esfuerzo por tratar de disminuir la cantidad de residuos plásticos, ya que utiliza PET o PEAD (Polietileno de alta densidad) para fabricar los tabiques. Están hechos completamente de estos plásticos. La empresa que surgió al crear los tabiques se llama Tabiques y estructuras reciclables Metepec. Es importante mencionar que el Ing. Mariano creó la maquinaria que hace realidad el producto; tritura y limpia las botellas que son recolectadas principalmente de escuelas, aunque también provienen de tiraderos cercanos.

⁶ v. (Byfusión, s.f.)

⁷ v. (Dávila, 2010)

⁸ v. (Schwanse, 2007, págs. 158-163)



*Ilustración 4: Tabique de plástico reciclado
(Schwanse, 2007)*

Panel ecológico Tlaxcala⁹ es una empresa que fabrica un panel con características similares al Panel W, pero está construido por varios plásticos reciclados y mezclados. Consta de un alma de acero tipo tridimensional calibre 10. Compite fuertemente en el mercado de los paneles, ya que tiene un precio de \$100.00 M.N. menor que la marca antes mencionada. El creador de la empresa es el Arq. César Moreno Sánchez.

La compañía Perfiles Plásticos¹⁰, ubicada en Morelia, fabrica cimbras, pérgolas, pisos, revestimientos, mobiliario, entre otros productos con PEAD reciclado, mezclado con algunos aditivos para mejorar sus propiedades. Las piezas fabricadas se trabajan igual que la madera natural, siendo capaz de soportar técnicas como el serruchado, taladrado, moldurado, entre otras, pero con la ventaja de hacerlo con mayor facilidad por la suavidad del material. Los acabados son sencillos, a base de pintura sobre la superficie de los productos, ya que al aplicar la técnica de prensado para elaborar los tableros, impide la aplicación uniforme de un pigmento dentro de la mezcla.

En San Martín de las Flores, Jalisco, existe otro ejemplo de madera plástica. La empresa Kuadro Soluciones Ecológicas¹¹ fabrica madera plástica con PEAD y PEBD como materiales principales, aunque han desarrollado tecnología de producción que permite incluir cualquier tipo de plástico en la mezcla. Es muy similar al producto de la compañía anterior, pero con la diferencia en los acabados. La empresa Jalisciense solo ha desarrollado productos con un solo tipo de color: una mezcla de puntos de colores oscuros y colores claros que asemejan, solo en textura y no color, a los tableros de madera aglomerada. En las especificaciones del material se menciona que es posible darle un acabado uniforme con pintura acrílica, la cual puede recibir por la superficie

⁹ v. (Schwanse, 2007)

¹⁰ v. Ídem; págs. 153-157

¹¹ v. (Kuadro, s.f.)

porosa que tiene el producto terminado. Cabe señalar que la compañía desarrolló un sistema constructivo con un producto a base de solo PEAD reciclado y una estructura metálica, que se encuentra bajo las normas que rigen al estado.



*Ilustración 5: Sistema constructivo Kwadro
(Kwadro, s.f.)*

Daissa¹² es una compañía de origen estadounidense, dedicada a fabricar pisos, sistemas de fachadas, plafones y mobiliario urbano con un material que se compone con la mezcla de polietileno reciclado, maderas de desecho y bambú natural. Las resinas obtenidas de la mezcla se pigmentan para producir un color negro uniforme. La madera y/o bambú que se incluyen en la mezcla producen en la resina propiedades mejores, como lo son rigidez y mejor estabilidad estructural al recibir rayos UV. Los productos de esta compañía destacan por la calidad de los acabados, que se incluyen en los productos por medio de la aplicación de películas plásticas con la impresión del acabado deseado e incluso con texturas en bajo relieve que emulan a la madera natural.

La compañía Vertech¹³, que es originaria de Inglaterra, junto con la School of EGINEERING at Cardiff University y Rutgers University's Advanced Polymer Center, desarrollaron un material compuesto¹⁴ con una matriz¹⁵ de PEAD reciclado, agregados de PP (Polipropileno) y fibra de vidrio, que tiene la capacidad de resistir esfuerzos considerables y con la ventaja de ser más ligero y económico que el acero. Se comprueba su capacidad estructural con la construcción de un puente que soporta un total de 44 toneladas, donde las vigas primarias y secundarias, duelas y

¹² v. (Grupo Daissa, s.f.)

¹³ v. (Vertech, 2013)

¹⁴ Material compuesto: material fabricado con dos o más materiales con diferencias significativas en sus propiedades físicas y químicas que combinados producen características diferentes a las de sus componentes en individual.

¹⁵ Matriz: material base en la mezcla de cualquier material compuesto. Se les llaman fases a los materiales agregados.

antepechos se componen del compuesto fabricado con PEAD reciclado. Los acabados ofrecidos por la compañía se limitan a colores oscuros uniformes, con el fin de reducir la identificación visual de la mezcla en el compuesto.



*Ilustración 6: Puente hecho a base de PEAD reciclado en proceso de construcción
(Vertech, 2013)*

Las instalaciones hidráulicas y sanitarias también tienen aplicaciones de PEAD reciclado, como lo son las tuberías para redes sanitarias, eléctricas y de gas fabricadas por la compañía Tigre ADS¹⁶ de Chile. Son ligeras y resistentes. Se pueden encontrar en presentaciones de perfiles extruidos tanto corrugados como lisos.

Ahora bien, en el plano de las investigaciones científicas, se realizó un experimento en el año 2003, que la revista científica “International journal of polymeric materials and polymeric biomaterials” publicó en internet en el año 2010, y habla sobre posibilidades de utilizar tabloncillos de PEAD reciclado decorativo para la construcción de elementos estructurales. En las conclusiones afirma que el material tiene las características necesarias para trabajar en estructuras, lo que falta es desarrollar más conocimiento sobre su comportamiento y es comprobado por una serie de pruebas mecánicas a dos diferentes temperaturas, una 40°C para simular la temporada caliente y otra a -21°C para la temporada fría.¹⁷

¹⁶ v. (ADS Tigre, 2013)

¹⁷ v. (R. Carroll, et al., 2003)

1.6. PEAD virgen aplicado en la construcción

El PEAD, como se ha explicado anteriormente, es un plástico que es transformado mediante diferentes técnicas en una gran variedad de formas, por lo tanto, es aprovechado para fabricar textiles con él, tal es el caso de las velarias¹⁸. En estas cubiertas, el Polietileno se transforma en hilos que son tejidos para formar una superficie que trabaja a tensión. Sus propiedades mecánicas y térmicas le permiten ser un plástico capaz de resistir los esfuerzos que demanda el sistema, así como las temperaturas a las cuales es sometido a la intemperie. Además, la propiedad de ser hidrofóbico, produce un rechazo natural al agua de lluvia.

También se utilizan para este sistema otro tipo de plásticos, es decir, el Polietileno no es el único material con el que fabrican las membranas, existen otros para otras aplicaciones más demandantes.

Asimismo, el Polietileno de Alta Densidad virgen, pero en presentación de película, también es utilizado para la fabricación de geomembranas¹⁹, las cuales son un recubrimiento efectivo para impedir el paso libre de los fluidos a la superficie donde se desea colocar, en pocas palabras, cumple la función de impermeabilizante. Sin embargo, el Polietileno no es el único utilizado para este fin, también Cloruro de Polivinilo (PVC) puede cumplir cabalmente con la tarea.

Los túneles, canales, rellenos sanitarios y piscinas de recolección de lodos, son ejemplos de construcciones de ingeniería donde la película de Polietileno es utilizada para impermeabilizar los terrenos donde se construyen. Esto permite que los materiales que contienen estas construcciones se encuentren libres de toda humedad y permitan a los elementos que trabajan estructuralmente funcionar al cien por ciento.

Un uso arquitectónico para dicha película de PEAD es la impermeabilización de techos verdes. La película favorece los escurrimientos de agua hacia los drenajes planeados para que funcione correctamente el sistema, así como la impermeabilización efectiva del material con el que se construyó el techo. Además, la ligereza de la película, permite al calculista reducir el peso que soportarán los elementos estructurales encargados de transmitir los esfuerzos producidos por el sistema de techo verde.

Por otro lado, los contenedores de agua o cualquier líquido de uso industrial²⁰, como estanques, tinacos y cisternas, también utilizan el Polietileno de Alta Densidad, principalmente por no

¹⁸ v. (Tensile structure systems, s.f.)

¹⁹ v. (Geotexan Geosintéticos de alta calidad, s.f.)

²⁰ v. (Efisa, s.f.)

absorber líquidos. El polietileno destinado para este uso es tratado para resistir esfuerzos mecánicos altos, además de no deteriorarse por la acción de los rayos ultravioleta. La técnica utilizada para fabricarlos es el rotomoldeo²¹, con moldes del tamaño deseado para generar elementos de una sola pieza y evitar uniones o costuras que puedan reducir la resistencia del depósito.

Hasta este momento se ha comentado sobre las aplicaciones del plástico elegido para la investigación tanto en estado virgen como reciclado, con ello se puede concluir que el Polietileno de Alta Densidad es un material plástico que resiste la acción de los rayos UV cuando se le aplica el tratamiento adecuado, también puede soportar esfuerzos mecánicos considerables que le permiten ser utilizado en una gran variedad de aplicaciones en la industria de la construcción, además, al no ser capaz de absorber agua (hidrofobia), lo convierte en un material ideal para aplicaciones donde la humedad sea constante. Por último, puede ser producido como hilo, película y cualquier forma rígida, por lo cual es útil en varias aplicaciones dentro de la industria de la construcción.

1.7. Conclusiones del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de 1000 botellas PEAD

En el libro de (Gómez Antón & Gil Bercero, 1997) se puede encontrar un análisis detallado del ciclo de vida de botellas PEAD. En él indica la metodología usada para elaborar el análisis de una forma más precisas.

Toca los puntos necesarios para desarrollar el análisis desde su producción, con Polietileno de Alta Densidad virgen, pasando por el consumo del producto, hasta el reciclado.

Deja claramente señalado las limitaciones de recolección de las botellas de PEAD, por esa razón realiza un cálculo que se toma con un valor del 70% de recuperación del material, para acercarse al gasto energético real del producto.

Conceptos	V	I	VE	V+RM	I+RM	VE
Energía total (Mj/kg)	194	193	168	158	158	147
Emisiones CO ₂ (kg/kg)	8	11	10	8	9	8
Emisiones NO _x (g/kg)	59	96	88	58	74	71
Agua total (l/kg)	57	57	56	64	64	64

²¹ v. Capítulo de métodos de procesamiento, sección rotomoldeo.

Residuos minerales (g/kg)	241	239	118	261	260	210
Residuo a vertedero	1087	97	97	213	98	98

V (vertedero), I (incineración), VE (valorización energética, RM (reciclado mecánico)

*Tabla 2: Datos obtenidos en los diferentes procedimientos de gestión
 Elaboración propia con datos de (Gómez Antón & Gil Bercero, 1997, pág. 336)*

En esta ocasión la información se enfocará en la mejor opción para tratar el producto después de haber sido consumido. Aclarando que en la investigación hecha por (Gómez Antón & Gil Bercero, 1997) tocan todos los puntos y se analizan las opciones disponibles en cada una de las etapas del producto.

En la tabla anterior aparecen los valores encontrados en el análisis del manejo de residuos plásticos en forma de botella de PEAD, la cual debe ser analizada resaltando los valores más pequeños que aparecen en ella, considerando los datos que ofrece, por ejemplo, en el concepto de energía total las combinaciones de vertedero + reciclado mecánico e incineración + reciclado mecánico, es la mejor opción, ya que el gasto energético es menor comparado con los otros tratamientos. En el siguiente concepto, los valores se separan un poco, y la mejor opción para reducir las emisiones de CO₂ (bióxido de carbono) es la combinación de vertedero + reciclado mecánico. En cuanto a emisiones de NO_x (Óxido de Nitrógeno), también el tratamiento que menos produce este contaminante es el vertedero + reciclado mecánico.

En los siguientes tres conceptos, el tratamiento de residuos de vertedero + reciclado mecánico es desplazado por otros. Se puede observar que el tratamiento que más ahorra agua es la valorización energética, y también es la mejor opción en los dos conceptos faltantes, porque la cantidad de residuos minerales que produce es menor al resto, así como los residuos que quedan en un vertedero.

En resumen, el tratamiento que reduce el impacto de consumo energético en todo el sistema es el reciclado mecánico que se realiza a partir de la recolección de las botellas que se encuentran en los vertederos y las separadas por escuelas o institutos que tienen programas de separación de basura, las cuales entregan el material a la empresa encargada de reciclarlas. Sin embargo, por los valores encontrados en el análisis, no en todos los conceptos se puede decir que el reciclado mecánico es la mejor opción, por el gasto superior de agua y la emisión de algunos residuos minerales. Aun así, el reciclado mecánico se considera la mejor opción de tratamiento de residuos plásticos, ya que vuelve el producto a ser utilizado, es decir, alarga la vida de las botellas PEAD, convirtiéndose en otros productos. Además el gasto energético es inferior.

Por lo tanto las conclusiones de (Gómez Antón & Gil Bercero, 1997) sustentan la utilización de PEAD reciclado mecánicamente para la elaboración de otros productos plásticos, como lo son la madera plástica, que día a día está aumentando su utilización.

1.8. Conclusión

Se consideran como puntos importantes sobre el problema de la basura plástica y las soluciones propuestas: 1) la cantidad de residuos plásticos en los vertederos nacionales (ocupan el 4° sitio), 2) el PP es el polímero más consumido en México y el PEAD es el segundo, 3) la clasificación de los plásticos según su facilidad de reciclaje coloca al PET como primer lugar, el PEAD en segundo y el PP en quinto, 4) las propuestas para reducir la cantidad de residuos plásticos mediante la arquitectura son muy variadas, desde utilizar el plástico en forma de botella hasta transformarlo en un producto totalmente nuevo, 5) el PEAD es un plástico con la capacidad de producirse en cualquier forma.

Se concluye que el Polietileno de Alta Densidad (PEAD) es el plástico que se encuadra mejor en las características necesarias para incluirlo en la arquitectura. La primera característica es la cantidad de este plástico en el país; es el segundo plástico mas consumido pero se elige sobre el primero, el PP, por la segunda característica: facilidad de reciclaje, donde el PEAD ocupa el segundo puesto y el PP el quinto. Y como tercera característica es la aplicación actual de este polímero en la industria de la construcción, lo cual indica que posee propiedades que lo colocan sobre el resto de los plásticos. En las líneas siguientes se describen dichas propiedades.

2. Madera Plástica de PEAD Reciclado (MPPR)

La madera plástica es un producto que se encuentra actualmente en la industria de la construcción y con un mercado creciente. Se utiliza el PEAD u otros plásticos reciclados para la producción de la madera plástica. Entonces, siendo el PEAD el plástico más adecuado para incluirlo en la arquitectura, se toma la decisión de estudiar a la MPPR, con el fin de integrarlo a la arquitectura con un nuevo punto de vista. Para ello se ven las propiedades del PEAD, así como sus posibles procesamientos que puede soportar, y a continuación se describe, detalladamente, lo que es la MPPR, sus propiedades y aplicaciones.

2.1. Desarrollo de la madera plástica

La madera plástica o plasti-madera es un producto fabricado, comúnmente, con plástico reciclado. Se produce con secciones similares a la madera natural, con la intención de sustituirla en algunas aplicaciones, principalmente decorativas. Los acabados de la madera plástica intentan emular a la madera natural, incluyendo texturas en bajo relieve, para que se adapte con mayor facilidad a los proyectos arquitectónicos donde se requiera madera natural.



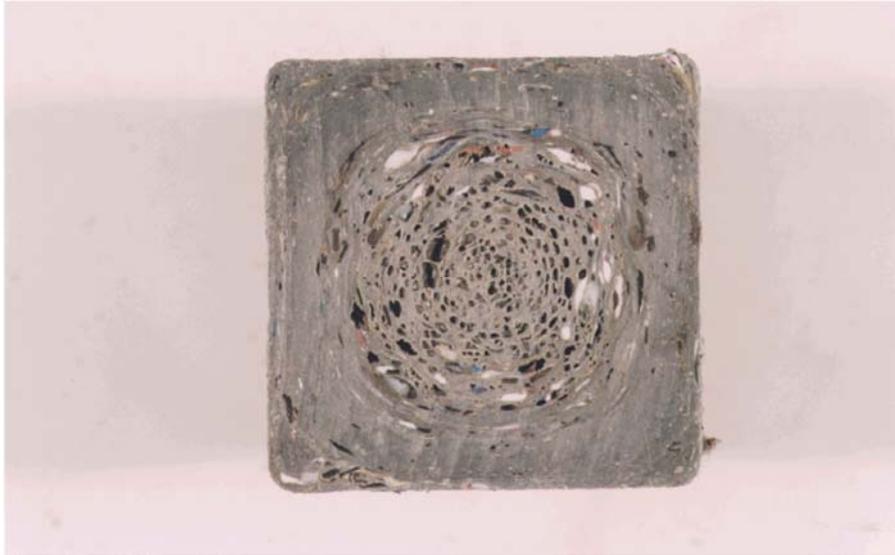
*Ilustración 7: Madera plástica.
(Grupo Gysapol, 2014)*

La madera plástica apareció por primera vez en Japón, a mediados de los años 1970's. En este lugar la cantidad de madera preparada para aplicaciones exteriores disponible no era suficiente para la demanda, por lo tanto decidieron utilizar materiales que les brindaran resultados similares y a bajo costo: la basura plástica.

Una década después, en Estados Unidos, emergieron pocas empresas que comenzaban a desarrollar la madera plástica. Su objetivo era fabricar un producto, a partir de la basura plástica, que supliera la madera natural. Los resultados obtenidos fueron un material con menor rigidez que la madera pero con dos ventajas principales: resistencia superior a las acciones ambientales y la reducción de la basura plástica en los vertederos.

El problema principal que surgió al comienzo de la industria de la madera plástica fue reproducir las propiedades del producto en todas las piezas que se fabricaban. Lo primero que se consiguió fue mantener una rigidez, aunque inconstante pero con un mínimo aceptable, que le permitía al

material incluirse con seguridad en algunas aplicaciones como sustituto de la madera natural. El color homogéneo de las piezas fue otro reto a superar, ya que el producto mezclaba plásticos de diferentes colores y texturas, al agregar un pigmento a la mezcla era imposible que mantuviera un color sólido en toda la superficie.



*Ilustración 8: Sección de madera plástica con mezcla de varios polímeros
(G. Lampo & J. Nosker, 1997, pág. 34)*

Se ha experimentado con la composición del material con varios tipos de plásticos. Las primeras pruebas para conseguir los perfiles se hicieron con la combinación de los plásticos rígidos que se encontraban en los basureros. Se pensaba que si se mezclaban por medio del calor los resultados en las propiedades y la densidad del material serían homogéneos, sin embargo no fue así. Las propiedades como resistencias a esfuerzos variaban entre las piezas fabricadas.

Entonces se continúa buscando el plástico que mejor se comportara al momento de reciclarlo para utilizarlo como material principal. Algunas empresas decidieron utilizar solo poliestireno, PVC, polipropileno o PEAD. Aquí se aprendió que la madera plástica que utilizaba PVC, polipropileno y poliestireno, requería mucha energía calorífica para la integración del material en comparación con el PEAD, sin embargo las ventajas de los anteriores polímeros como la rigidez que presentaba la madera plástica, condujeron a una serie de empresas elegirlos sobre el PEAD.

Otras empresas fabricantes decidieron hacer una mezcla del PEAD con algún otro polímero para aumentar su rigidez, los mejores resultados se presentaron combinando el polipropileno o el poliestireno al PEAD. Este tipo de madera plástica adquirió mejor rigidez pero aumentaba el costo de producción por la cantidad de energía que se necesitaba para realizar la mezcla y el proceso de elaborarla requería separar los plásticos para aumentar su temperatura para después mezclarlos cuando tuvieran una viscosidad similar. Las empresas que utilizaron este

procedimiento aumentaron el precio de su producto ofreciendo un material con una rigidez superior que sus competidores.

Las fábricas de madera plástica que se fueron extendiendo por todo Estados Unidos fueron las que utilizaban solo PEAD en su composición. Este tipo de madera plástica fue ganando terreno en el mercado porque mantenía una relación de costo-beneficio bastante aceptable, incluso compitiendo con los costos de la madera natural tratada para exteriores.

La madera natural laminada y tratada que se utiliza para algunas aplicaciones estructurales en el exterior fue cediendo su lugar para que ingresara a la misma aplicación la madera plástica reforzada con fibra de vidrio. El costo del material y el mantenimiento menor fueron las principales razones de lo sucedido.

En ese momento, es decir en los años 90's, se comienza a experimentar con mezclas de PEAD y fibras de vidrio que le dan a la madera plástica una rigidez mayor. Los problemas que se presentaron con este tipo de mezclas fueron la integración adecuada de la mezcla, ya que el PEAD no es capaz de recibir en su composición la fibra de vidrio, las rechaza, por lo tanto se decidió realizar la mezcla por medio de la tecnología de los materiales compuestos.

La tecnología de los materiales compuestos consiste en unir dos o más materiales para que trabajen juntos para un fin. En este tipo de materiales las propiedades de uno se suman al otro para mejorar su comportamiento en las aplicaciones para los que fueron diseñados. La base de la mezcla se le llama matriz, a partir de este material se trabaja para reforzarlo con otro que se le llama fase.

Hoy en día se pueden distinguir en el mercado varios tipos de madera plástica que tienen aplicaciones específicas. Abajo se encuentra la clasificación:

- **Madera plástica de PEAD reciclado:** Se compone de Polietileno de Alta Densidad con varios aditivos que estabilizan el polímero para usos en exteriores.
- **Madera plástica de mezclas recicladas:** Se utiliza el Polietileno como principal componente pero se le agregan toda clase de termoplásticos para conseguir que el material sea más económico. Existe mucha variedad de propiedades en este tipo de madera plástica.
- **Madera plástica reforzada con fibras de madera:** Esta clase de madera plástica adquiere mayor rigidez al combinarla con aserrín o fibras de madera orientadas.
- **Madera plástica reforzada con fibras de vidrio:** Se considera como la madera plástica estructural cuando se fabrica con fibras orientadas al flujo de la extrusión.

A pesar de que estos son los tipos de madera plástica que más se comercializan en la industria de la construcción en Estados Unidos, existen otros tipos que se consideran como estructurales, entre los que destacan: co-extrusión de acero y PEAD, donde el PEAD es reforzado con varillas de acero para usos más exigentes; múltiples laminas y orientadas de PEAD, que fortalecen el material y le dan propiedades distintas.

2.2. Polietileno de Alta Densidad (PEAD)

Como se dijo en el capítulo anterior, el Polietileno de Alta Densidad es el material más adecuado para incluirlo en la arquitectura de México, por lo tanto se estudian sus propiedades que pueden influir en el comportamiento mecánico del mismo. Además se realiza el estudio porque es el componente principal en la fabricación de la madera plástica que es más amable con el ambiente. Así lo explican (Platt, Lent, & Walsh, 2005) en su estudio realizado a una notoria cantidad de compañías fabricantes de madera plástica en Estados Unidos, donde el producto con mayor contenido de PEAD recuperado de los vertederos es preferible a cualquier otro polímero e incluso cualquier mezcla.

El PEAD es un polímero muy joven, ya que su origen data del año de 1955, cuando Karl Ziegler y Keiser Wilhelm diseñaron su composición y elaboraron la primera muestra. En el diseño se encuentran propiedades importantes de las cuales destacan: la capacidad de impedir el paso de la humedad, la buena rigidez adecuada para algunas aplicaciones estructurales, la inactividad química y buena estabilidad térmica (Lester, 2013); sin embargo, la tendencia a la deformación por la acción del incremento de la temperatura ambiental y la tendencia a degradarse a causa de los rayos UV impide que sea considerado como un plástico de ingeniería (Rubin, 2008, pág. 76).

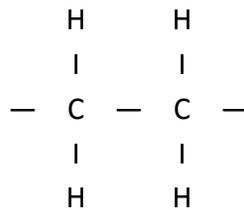
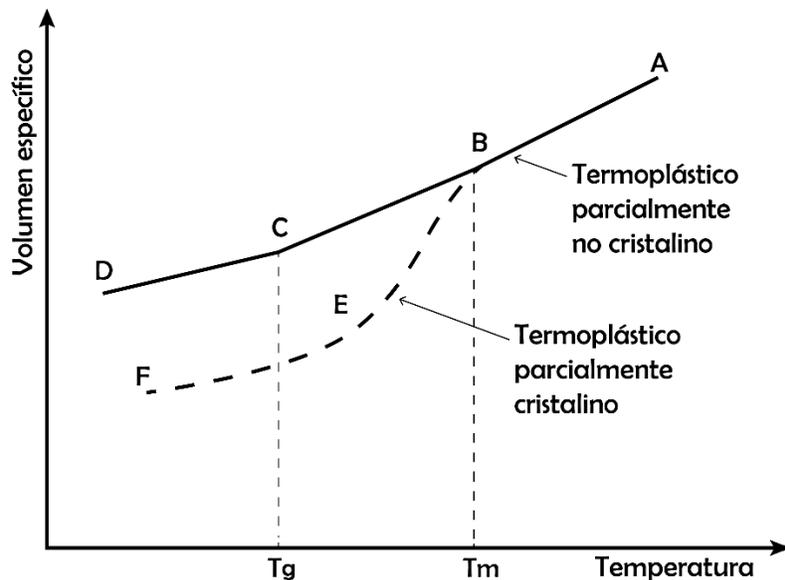


Ilustración 9: Formula química del PEAD

2.2.1 Propiedades térmicas

El Polietileno de Alta Densidad, mejor conocido por las siglas PEAD o en inglés como HDPE, es un plástico que pertenece a la familia de los termoplásticos, es decir, posee la capacidad de tomar cualquier forma por medio del calor al alcanzar la temperatura de fusión que se ubica en el rango de 120°C a 135°C.

Como cualquier otro termoplástico, el PEAD se ve afectado por la temperatura. El estudio del comportamiento de este tipo de polímeros bajo distintas temperaturas se realiza a partir de encontrar dos niveles de temperatura donde ocurren cambios importantes en su estado físico. A bajas temperaturas se ubica la fase de transición vítrea (T_g) y a altas temperaturas se ubica la transición de fusión (T_m).



Gráfica 3: Temperatura de transición vítrea y de fusión en los termoplásticos
Elaboración propia con datos de (Smith, 1993, pág. 419)

Si la temperatura se encuentra por debajo de la transición vítrea, el material se vuelve quebradizo al aplicarle cualquier esfuerzo; en cambio, cuando se encuentra justo en el punto de transición, su capacidad para resistir esfuerzos sin deformarse, alcanza su mayor nivel; por último, si se sube la temperatura hasta rebasar la transición, el termoplástico desarrolla un comportamiento dúctil, es decir, soporta deformación plástica. Al alcanzar el punto de transición de derretimiento, el polímero pasa de estado sólido a estado líquido y puede moldearse en cualquier forma.

El PEAD alcanza su punto de fusión en un rango de temperatura entre 120°C y 135°C, mientras que la temperatura de transición vítrea es de -110°C, esta última se encuentra muy por debajo de la temperatura ambiente de la Cd. de México, lo cual representa un problema para la resistencia mecánica del material cuando se busca rigidez. Es importante mencionar que la transición vítrea de cualquier polímero puede ser modificable por medio de la incorporación de aditivos, los cuales funcionan como estabilizantes térmicos.

Reciclar el PEAD no modifica la temperatura de transición vítrea por lo que es necesario ayudar al polímero a mantener cierta estabilidad bajo temperaturas altas mediante aditivos diseñados para ello cuando se utiliza para elaborar MPPR.

El coeficiente de expansión térmica que presenta el PEAD virgen en comparación con el material reciclado es mayor, por lo que debe considerarse para el diseño de estructuras.

(G. Lampo & J. Nosker, 1997, pág. 60) menciona que la madera natural tiene un coeficiente de expansión térmica menor a la madera plástica por lo que se convierte en una limitación al aplicarlo en alguna construcción. Por otro lado la madera plástica no absorbe agua ya que el PEAD es un material hidrofóbico, pero la madera natural si lo hace y se expande bastante. El coeficiente de expansión térmica de la madera plástica esta entre 0.00013 a 0.000065 por cada grado centígrado que aumente.

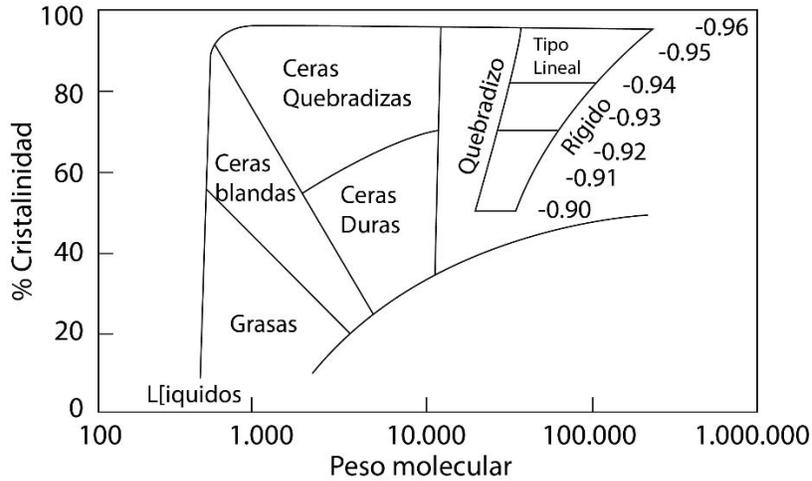
2.2.2. Cristalinidad

La cristalinidad es una propiedad de la materia que es distinguible solo a nivel molecular. El término se refiere a la forma en que se ordena la estructura molecular y se mide en porcentajes, los cuales indican la cantidad de moléculas que se encuentran ordenadas linealmente, es decir, mientras más alineadas se encuentren las moléculas unas con las otras, el porcentaje de cristalinidad es mayor. La cristalinidad afecta las propiedades mecánicas, por ello es necesario estudiarlas.

Los polímeros cristalinos mantienen una estructura molecular linear recta entre cada una de las cadenas, en cambio los polímero amorfos se distinguen por presentar una estructura desordenada, sin líneas rectas, con cadenas enredadas una con la otra.

La gráfica 4 relaciona el peso molecular con el porcentaje de cristalinidad, ubicando en cada una de las áreas el tipo de Polietileno que se obtiene modificando el peso molecular o la cristalinidad del mismo. Se puede observar que mientras mayor sea el peso molecular y la cristalinidad el producto es más rígido, por lo cual se puede decir que tanto el peso molecular como la

crystalinidad están relacionadas directamente y de forma lineal con el estado rígido del polietileno.



Gráfica 4: Cristalinidad y peso molecular de los distintos tipos de PE
 Elaboración propia con datos de (Reyes Vigil Montaña, et. al., 2002, pág. 110)

El PEAD tiene una estructura de cadena lineal y un grado de cristalinidad del 92%, lo cual le confiere propiedades superiores al PEBD, que tiene una estructura ramificada y un grado mucho menor de cristalinidad.

En la sección de comportamiento mecánico, la gráfica 5 muestra los efectos de la cristalinidad en la resistencia de los materiales antes mencionados bajo los mismos esfuerzos. Se puede observar que el PEAD mantiene una relación de esfuerzo-deformación constante más prolongada que el PEBD, dando lugar a la conclusión de que un material con un porcentaje mayor de cristalinidad, posee mejores propiedades para ser utilizado estructuralmente.

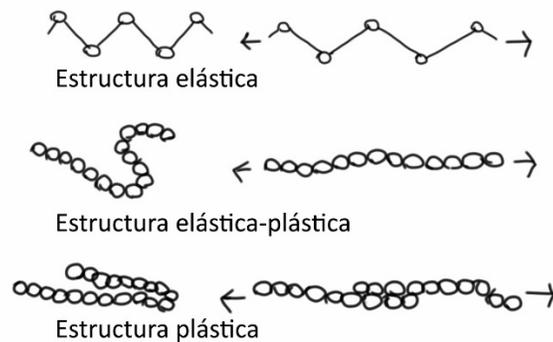


Ilustración 10: Estructura molecular de algunos polímeros
 (Smith, 1993, pág. 420)

Otra característica importante que debe considerarse en cuanto a la cristalinidad de los polímeros es la posibilidad de cambiar su estructura molecular por medio de esfuerzos mecánicos. Al momento que se está trabajando en el modelado de alguna pieza plástica y se aplica un esfuerzo de tensión sobre ella, la estructura molecular del polímero se reajusta y por lo tanto aumenta su cristalinidad²². Esto es aprovechado por algunos fabricantes de MPPR al momento de extruir el perfil, un momento después del inicio del proceso de enfriado.

2.2.3 Propiedades mecánicas

Con el fin de analizar las propiedades mecánicas del PEAD, se estudian también las de los polímeros más consumidos en el mundo. De esta manera se tiene la certeza del lugar que ocupa el PEAD, en cuanto a su comportamiento mecánico, con los otros polímeros.

La densidad de un material relaciona el peso con el volumen, es decir, cuanto peso tiene una pieza con respecto al volumen que ocupa. Es importante conocer el peso de los materiales que se utilizan en la construcción, con el fin de evitar que se sature la resistencia de los materiales que los soportan, y de esta manera evitar fallas en la estructura. En la tabla 2 se observa la densidad de los materiales plásticos más utilizados. El teflón es el más pesado de los polímeros presentados con 2.14 g/cm^3 y comparado con el PEAD, este último es mucho más ligero con solo 0.95 g/cm^3 .

Ahora bien, si se considera el esfuerzo máximo, el módulo de elasticidad y la densidad para decidir cuál es el polímero que mejor se comporta bajo acciones mecánicas, no hay duda que el PP (polipropileno) es el plástico con el mejor equilibrio en las propiedades que se muestran en la lista. Es el más ligero de todos; de entre los ligeros es el que tiene mayor resistencia y el más rígido de todos. Lo que impide que no sea un buen plástico para utilizarlo en la industria de la construcción como un material reciclado, es la cantidad de energía que se utiliza para retransformarlo. En este último aspecto el PEAD lo supera; además en la tabla de propiedades mecánicas ocupa el tercer puesto, con un equilibrio entre las propiedades que se consideran para la selección del mejor polímero que cubra las necesidades requeridas en la construcción y protección al medio ambiente.

Otra prueba mecánica que regularmente se hace para productos plásticos de empaque es la fuerza que puede resistir al impacto, es decir, el esfuerzo que puede resistir a una fuerza intensa y de poca duración, como lo es una caída. El PEAD tiene una resistencia de 2.18 a 217.73 kg-cm/cm, compitiendo muy de cerca con el resto de los polímeros.

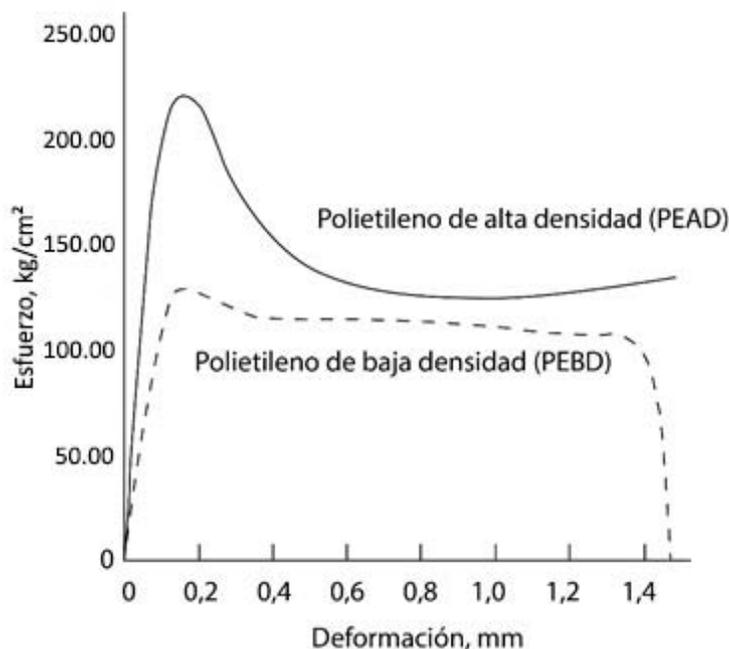
²² Ver ilustración 10.

Material	Densidad (g/cm ³)		Módulo (kg/cm ²)		Esfuerzo máx. (kg/cm ²)		Elongación a rotura (%)		Fuerza impacto (kg-cm/cm)	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
PP	0.90	0.91	11,216.70	16,315.20	316.11	418.08	100.00	600.00	16.33	
PEBD	0.92	0.93	1,733.49	2,855.16	91.77	147.86	100.00	650.00	No rompe	
PEAD	0.95	0.97	10,808.82	11,114.73	224.33	316.11	10.00	12.00	2.18	217.73
PS	1.04	1.05	23,453.10	33,650.10	367.09	530.24	1.00	1.50	2.18	2.45
Nylon 6.6	1.13	1.15			774.97	846.35	60.00	300.00	4.35	11.43
PMMA	1.17	1.20	22,433.40	31,610.70	489.46	774.97	2.00	10.00	1.63	3.27
PC	1.20		24,472.80		673.00		110.00		87.09	
Fenol-formal	1.24	1.32	28,551.60	48,945.60	346.70	632.21	1.50	2.00	1.09	21.77
PVC	1.30	1.58	24,472.80	41,807.70	418.08	530.24	40.00	80.00	2.18	108.86
PET	1.34	1.39	28,551.60	41,807.70	601.62	734.18	50.00	300.00	1.09	4.35
Teflón	2.14	2.20	4,078.80	5,608.35	142.76	346.70	200.00	400.00	2.18	5.44

Tabla 3: Propiedades de los plásticos más comunes.

Elaboración propia con datos de (Gómez Antón & Gil Bercero, 1997, pág. 64)

La siguiente gráfica muestra la comparación de resistencias entre el PEAD y el PEBD bajo esfuerzos de tensión. El PEAD es más resistente por casi el doble que el PEBD.



Gráfica 5: Esfuerzo deformación PEAD y PEBD
 (Gómez Antón & Gil Bercero, 1997, pág. 62)

El PEAD virgen es capaz de resistir un esfuerzo a tensión último de 224 Kg/cm² a 316 Kg/cm². La gráfica 5 muestra una zona elástica menor en comparación a la zona plástica y un interesante comportamiento elasto-plástico en la transición de ambas zonas.

2.2.4 Aditivos

Los aditivos son sustancias que se agregan a los plásticos para modificar sus propiedades físicas, químicas, eléctricas o reológicas²³; con el objeto de alcanzar las especificaciones de diseño y facilitar el procesamiento del material (Morales Méndez, 2010).

Los aditivos más utilizados en los plásticos son los siguientes (Morales Méndez, 2010):

- Absorbentes de luz ultravioleta
- Agentes antiestáticos
- Lubricantes
- Antioxidantes
- Ayudantes de proceso
- Cargas
- Catalizadores
- Desmoldantes
- Espumantes
- Estabilizadores térmicos
- Fungicidas
- Inhibidores de reacción
- Modificadores de impacto
- Pigmentos
- Plastificantes
- Materiales reforzantes
- Retardantes de flama

Para comprender mejor la acción de los aditivos, a continuación se describen algunos de ellos (Gómez Antón & Gil Bercero, 1997, págs. 120-133):

- Lubricantes
Se utilizan para disminuir las fuerzas de rozamiento entre dos superficies.

²³ Rama de la física de medios continuos que se dedica al estudio de la deformación y el flujo de la materia.

- **Plastificantes**
Facilitan la transformación del material y aumentan la resistencia al impacto.
- **Cargas**
Ayudan a reducir el costo del material y aumentan la procesabilidad de los termofijos.
- **Refuerzos**
Mejoran las propiedades mecánicas del plástico. La fibra de vidrio, las de carbono, las fibras de kevlar o nomex, son las más utilizadas.
- **Estabilizantes térmicos y antioxidantes**
Disminuyen la degradación por temperaturas altas durante su transformación y aumentan la resistencia a la radiación ultravioleta para alargar su vida útil.
- **Retardadores de llama**
Alteran el proceso de combustión que comúnmente un plástico sufre.
- **Espumantes**
Aligeran los materiales y consiguen propiedades aislantes térmicas y acústicas. Además se utilizan para obtener plásticos de productos protectores flexibles por su capacidad de amortiguación al impacto.
- **Otros aditivos**
Entre ellos encontramos colorantes, antiestáticos²⁴ y biocidas²⁵.

2.2.5 Métodos de procesamiento

Los plásticos, en general, tiene como característica principal la capacidad de transformarse en cualquier forma, desde las cuadradas hasta las más orgánicas, utilizando poca energía para lograrlo; por lo que se cumple lo que una vez escribió Robert Hooke (filósofo experimental inglés y prolífico inventor) en el año de 1664: “Muchas veces he pensado que seguramente existe un camino para averiguar cómo hacer un compuesto artificial y pegajoso que se parezca mucho a ese excremento con el que el gusano de seda teje su capullo.” (Quarmby, 1976).

El Polietileno de Alta Densidad, por sus propiedades, tiene la capacidad de transformarse en casi cualquier método, por ejemplo: en forma de película mediante los procesos de película colada y película soplada por extrusión, extrusión de láminas y perfiles, moldeado por inyección, soplado o rotacionalmente. También puede fabricarse en formas esponjadas si se añade un agente de soplado. Asimismo, puede moldearse por compresión, aunque no es muy utilizado comercialmente (Rubin, 2008, pág. 77).

²⁴ Evitan las cargas estáticas.

²⁵ Eliminan bacterias.

A continuación se explican, de manera general, cada uno de los métodos de procesamiento (Hernández Luna, et al., 2010):

1. **Extrusión.** Es un proceso de transformación del plástico, más específicamente un termoplástico, donde es forzado a salir a través de una boquilla, la cual tiene el perfil que tomará. Por esta boquilla fluye en estado fundido al aplicarle presión y calor constantes. Cuando el material sale por la boquilla la siguiente fase es la de enfriado, donde la pieza extruida pierde viscosidad y adquiere dureza; al final la pieza es recogida por un sistema de arrastre de velocidad variable, donde es recortada a una medida específica. Con este proceso es posible fabricar varillas, tubos, recubrimientos de cables y películas. El material que se coloca en la extrusora debe estar en presentación de pellet o granza, o bien, en polvo.
2. **Extrusión y soplado.** Este proceso utiliza simultáneamente la técnica de extrusión, que empuja el material por una boquilla y, al salir de ella, la inyección de aire para provocar la separación de las paredes del plástico extruido. Además, el soplado funciona como enfriador. Saliendo de la burbuja de aire, el material es enrollado para su empaque. Este proceso es utilizado principalmente para la elaboración de productos destinados al empaque, como bolsas, películas y botellas. Para el moldeado de botellas el proceso es muy similar, primero se coloca la cantidad necesaria de material en una pieza que la sostiene y enseguida es introducida a un molde donde este, al ser soplado en el interior del mismo, genera una burbuja y toma la forma del molde. El molde se abre, se enfría el material y se extrae la pieza moldeada.
3. **Rotomoldeo o centrífugo.** El rotomoldeo es una técnica de transformación de los plásticos que utiliza la energía centrífuga para moldear el material que se vacía en los moldes. Consiste en verter la cantidad exacta de polímero, en polvo, en un molde que es capaz de girar a distintas revoluciones. Una vez que el material está en el molde, se cierra y comienza a girar, enseguida el material se calienta hasta llegar a la temperatura de fundido (T_m), y por lo tanto, el plástico se desplaza con facilidad por cada uno de los rincones que el molde posee, tomando perfectamente la forma del mismo. Es posible dejar enfriar el plástico un poco dentro del molde, para después agregar otra sustancia, y de esta manera genera productos multicapa, que son capaces de resistir esfuerzos considerables. Cabe mencionar que es utilizado para fabricar objetos esféricos o cilíndricos como tanques, mangueras, tubos de gran diámetro, juguetes, sillas, partes automotrices, entre otros. Además, este proceso ofrece precisión tanto en la forma como en el grosor de la pieza fabricada, es decir, es ideal para procesar productos plásticos de ingeniería.
4. **Calandreo.** Si se requiere fabricar láminas plásticas, o películas muy delgadas, éste proceso es el ideal para tal objetivo. Consiste, básicamente, en hacer pasar material

plástico a una temperatura por encima de la transición vítrea (T_g) pero por debajo de la temperatura de fusión (T_m), donde el material es dúctil, por una serie de pares de rodillos, los cuales presionan progresivamente el plástico hasta alcanzar el grosor que se requiere. Una vez terminado el proceso de reducción del calibre, el material tiene dos opciones, ir hacia otro rodillo que lo embobina, o descansar sobre una plancha donde se enfría, y así generar una lámina del plástico introducido. Por medio de este proceso es posible imprimir grabados con bajos y altos relieves, o bien, impresiones de colores distintos que se colocan sobre los rodillos donde pasa el material. Comúnmente lo utilizan para realizar un grabado que sea similar a la piel que tienen productos como chamarras, sillones o zapatos. Las películas producidas por una máquina de calandreo pueden usarse como recubrimientos para papel.

5. **Termoformado.** Técnica aplicada para la conformación de láminas acanaladas o cualquier producto que no se necesite estar cerrado completamente. Para fabricar un producto mediante este proceso se requiere que el material se encuentre en forma de lámina y pueda ser reblandecido con calor, el cual permite adaptarse al molde donde vaya a ser depositado, y mediante presión, alcanzar la forma del molde. Al enfriarse se retira del molde y la pieza queda lista para ser usada. Existen tres tipos de técnicas para conseguirlo: aire a presión, vacío o con un contramolde. La principal desventaja de utilizar este proceso es que la lámina puede reducir mucho su grosor al momento de adaptarse al molde, por esa razón es necesario estar revisando constantemente las piezas que se obtienen para controlar la calidad de todo el objeto. El proceso es, bien planeado y supervisado, muy rápido y eficaz a comparación de otros, pero sólo para éste tipo de productos.
6. **Laminado.** Es una técnica de transformación del plástico que utiliza maquinaria de calandreo para forrar con una lámina algún otro material, para protegerlo o mejorar algunas propiedades. Este término se utiliza para denominar a cualquier producto que está fabricado por capas, ya sean estos del mismo material o distintos. Comúnmente, en los plásticos de ingeniería, los refuerzos como la fibra de vidrio, la fibra de carbono o fibras de acrílico o poliéster son componentes principales del polímero; esto mejora considerablemente la resistencias mecánicas y térmicas, así como un peso más ligero, comparado con otros materiales con similares resistencias. Este tipo de materiales son conocidos como mixtos o compositos (composites). La aplicación de este tipo de materiales va desde recubrimientos en partes de automóviles hasta de aviones, ya que son ideales por el ahorro en peso que se logra.
7. **Sinterizado.** El proceso de transformación de sinterización sólo puede ser aplicado a polímeros de alta cristalinidad y estructuras lineales que no pueden llegar a un estado líquido totalmente definidos, es decir, poseen una alta viscosidad. Uno de ellos es el teflón, que se coloca como recubrimiento de sartenes y algunos moldes para cocinar. El

proceso es muy sencillo: el plástico se vacía sobre la superficie que se desea aplicar el recubrimiento, pero éste debe estar en forma de polvo; ya que está en su sitio se procede a calentarlo a una temperatura de 327 °C y enfriarlo lentamente, siguiendo una curva de temperatura-tiempo que permita que la estructura de las macromoléculas se adapten entre sí y formen esferulitas²⁶. En resumen, es un proceso para crear recubrimientos a superficies que resistan las condiciones que se necesitan.

8. **Vaciado.** En palabras simples, consiste en vaciar una cantidad específica de plástico fundido sobre un molde abierto, para posteriormente endurecerse por enfriamiento a temperatura ambiente o por reacción química. En algunas ocasiones es combinado con vacío, centrifugado y otras técnicas de densificación o compactación, únicamente para mejorar sus propiedades cuando es necesario por los requerimientos de diseño. Con ésta técnica se pueden fabricar productos como estatuas, instrumentos, barras, tubos, placas y películas. Es importante subrayar que la fabricación de placas es la más común en este tipo de trabajado del material.
9. **Inmersión.** Como su nombre lo indica, consiste en sumergir algún producto que se desea recubrir con un polímero, en un recipiente que contiene el plástico fundido, se retira el objeto y se deja enfriar, de esta manera queda recubierto con el polímero especificado. La técnica es eficiente para recubrir metales, principalmente, ya que los protege de la entrar al inyector, el cual tiene la tarea de impulsarlo con cierta presión, regulada en la corrosión y oxidación; también mejora la comodidad para sujetar ciertos objetos y puede ser antiderrapante. Los aspersores de polímeros pueden sustituir la técnica de inmersión, ya que se utiliza el plástico como pintura electrostática, lo cual provoca una mejor adherencia en el metal donde se coloca.
10. **Inyección.** El método por inyección es el más preciso para realizar formas con errores mucho menores al milímetro, y por lo tanto, es utilizado para fabricar piezas que necesitan ensamblarse con precisión. El material plástico debe estar en estado fundido para mayoría de las veces, para hacerlo entrar a un molde metálico, y lo llene completamente, sin dejar ningún espacio sin material. A continuación se deja reposar y enfriar para luego desmoldar. Las piezas que se obtienen pueden adquirir la densidad que necesite para lo que fueron diseñadas, gracias a la presión controlada que este sistema posee. Las máquinas de inyección tienen la capacidad de fundir material en polvo o pellet, por medio de una tolva, para hacer llegar al inyector el material fundido para su posterior moldeado en la cavidad donde se encuentra la pieza metálica con la forma que tomará el plástico.

²⁶ Tipos de materiales cristalinos.

2.2.6 Métodos de conexión

Algunas ocasiones, para terminar un producto, se requieren unir una o varias piezas entre ellas. Para ello, generalmente se utilizan adhesivos o procedimientos clásicos de soldadura. La siguiente tabla contiene los principales procedimientos de unión.

Conducción de calor	Directa	Herramienta caliente; manguito caliente, ... Eléctrica: manguito caliente
	indirecta	Contacto térmico Impulsos térmicos
Fricción	Interna	Alta frecuencia Ultrasonidos
	externa	Rotación-fricción Vibración
Convección	Gas caliente: soldadura de aportación Gas caliente: con extrusora	
Radiación	Soldadura por radiación Láser Láser con extrusora	
Inducción	Soldadura electromagnética	

*Tabla 4: Algunos procedimientos de soldaduras de plásticos
 (Gómez Antón & Gil Bercero, 1997, pág. 150)*

El uso de tornillo o remaches no son adecuadas para este tipo de materiales, siempre se deben evitar a medida de lo posible. En cambio la soldadura es un excelente método para hacerlo, y consiste en la unión sólida de dos piezas mediante la fusión de determinadas partes de la misma. La soldadura sólo funciona para los plásticos que son capaces de fundirse y no perder sus propiedades, es decir los termoplásticos, ya que los termofijos no se funden una vez endurecidos (Gómez Antón & Gil Bercero, 1997, pág. 149).

Existen adhesivos sintéticos con la capacidad de unir dos piezas plásticas y mantenerlas así, incluso con la acción prolongada de esfuerzos altos (Gómez Antón & Gil Bercero, 1997, pág. 149).

2.3. Propiedades de la MPPR

2.3.1 Propiedades mecánicas

La pérdida de propiedades mecánicas cuando se recicla el PEAD es clara cuando se compara la MPPR, ya que la madera plástica presenta un esfuerzo de tensión último aproximado de 100 Kg/cm² a 120 Kg/cm² cuando no se le refuerza con alguna fibra. Entonces reduce su capacidad de carga a la mitad o cerca de la mitad con la que fue diseñado polímero. Esto sucede por la

combinación de hojuelas que provienen de diferentes fabricantes del PEAD y posibles impurezas que presente la materia prima.

Con base al análisis realizado a las propiedades que la ficha técnica de los productos de varias empresas que se dedican a su fabricación y de algunos artículos científicos que hablan sobre el comportamiento estructural del MPPR, se llegó a una serie de conclusiones que se comentarán a continuación.

	Polyex		Resco plastics incorporated	Plastic lumber yard	Green plastic lumber
	-23.3°C	40.6°C			
Resistencias a esfuerzos de compresión kg/cm ²	528.204	116.246	274.12	100	137.66
Módulo kg/cm ²	17,335.175	2,753.234		3585	
Resistencias a esfuerzos de flexión kg/cm ²	373.210	90.141	256.81	95	143.78
Módulo kg/cm ²	22,535.728	5,098.581		6744	
Resistencias a esfuerzos de tensión kg/cm ²	206.999	117.265			
Módulo kg/cm ²	19,272.636	4,486.751			
Resistencias a esfuerzos de cortante kg/cm ²	116.246	95.342	71.063		

Tabla 5: Comparativa de cuatro diferentes marcas de MPPR (parte 1)
 Recopilación de varias fuentes, ver anexo.

	American plastic lumber	Gysapol	CPAR	Louisiana State University (4x4)		
				1	2	3
Resistencias a esfuerzos de compresión kg/cm ²	165	138.06	122.364 a 245.748	142.548	105.75	91.045
Módulo kg/cm ²	8077			6,383.981	4,719.139	4,004.007
Resistencias a esfuerzos de flexión kg/cm ²	193			130.657	105.68	94.422
Módulo kg/cm ²	15503			5,943.32	5,088.314	4,485.616
Resistencias a esfuerzos de tensión kg/cm ²			87.898 a 245.748			
Módulo kg/cm ²		5,892.94	4,180.77 a 12,644.28			
Resistencias a esfuerzos de cortante kg/cm ²						

Tabla 6: Comparativa de seis diferentes marcas de MPPR (parte 2)
 Recopilación varias fuentes, ver anexo.

Es preciso señalar que las pruebas que se realizaron en las piezas de cada una de las marcas presentadas fueron reglamentadas por el ASTM de plásticos sólidos, según la información que ofrecen las fichas técnicas. Las normas son las siguientes:

- Resistencia a esfuerzos de compresión: ASTM D695
- Resistencia a esfuerzos de flexión: ASTM D790
- Resistencia a esfuerzos de tensión: ASTM D638
- Resistencia a esfuerzos de cortante: ASTM D732

Sin embargo, hoy en día existen pruebas que están dirigidas a la madera plástica de casi cualquier composición. A partir de 1997 surgieron como resultado de un estudio realizado por (G. Lampo & J. Nosker, 1997), en el cual intentan generar datos que ayuden a comprender el comportamiento estructural de la madera plástica. Más adelante se mencionarán algunos detalles sobre la anterior investigación.

Las pruebas a compresión son las más comunes en este tipo de material, aunque las pruebas de flexión y el módulo de elasticidad también se realizaron en algunas empresas. Esto respalda el hecho de que la madera plástica trabaja mejor a compresión que a tensión, ya que se le da mucha importancia por los diferentes fabricantes. Incluso el ASTM actual, rechaza los esfuerzos a tensión, por su poca resistencia y la capacidad de fluencia que posee. La madera plástica puede deformarse entre 600% - 800% del tamaño de la sección, en cambio la madera natural solo el 0.7% (G. Lampo & J. Nosker, 1997).

Estos últimos valores indican que el material fluye bajo una carga constante, por lo que el uso de la madera plástica bajo este tipo de esfuerzos debe ser limitado al módulo de elasticidad que ostente y la fluencia estudiada cuidadosamente en laboratorio. Además, como lo dice el reporte de (G. Lampo & J. Nosker, 1997), analizando el mobiliario que se hace con MPPR se puede llegar a la misma conclusión, corroborando los valores encontrados.



*Ilustración 11: Juego de bancas y mesa para playa
Fuente: Catalogo "Imagenia" de bancas*

En la imagen superior se puede observar claramente que las piezas que trabajan a flexión están apoyadas sobre tres puntos, además las piezas perimetrales de la banca y la mesa utilizan las piezas de forma que el esfuerzo perpendicular de la flexión lo reciba el lado largo de la sección. Las piezas que se utilizan para recibir esfuerzos de flexión deben ser reforzadas por otros elementos que aporten rigidez a la pieza, provocando así, claros cortos en comparación a la madera natural.

Los valores de resistencia entre cada una de las empresas analizadas son muy variados. Esto hace imposible realizar un sistema de cálculo que aplique para toda marca de MPPR. Deben elaborarse cálculos independientes para el diseño de elementos portantes de acuerdo a la marca que se utilice.

La razón por la cual existe tanta variación es la proporción de materia prima y aditivos que agregan a la mezcla, así como la calidad del PEAD reciclado que se utiliza. Incluso los métodos de procesamiento influyen en la calidad de la madera plástica producida

La variación de mezclas tiene su origen en dos principales razones: 1) la inexistente reglamentación estricta en la fabricación de piezas con plástico reciclado y, 2) la necesidad de crear una formulación ideal para cada sistema de fabricación de la pieza (vacío, extrusión, inyección).²⁷

²⁷ De acuerdo a la entrevista con la I.Q.I. Sandra Pioquinto, jefe de planta de la empresa Gysapol.

El PEAD virgen no presenta anisotropía (comportamiento de los materiales que produce variación de sus propiedades según la ubicación de la prueba que se realice) que sea considerable para su estudio, en cambio, el material reciclado sí, porque la mezcla de diferentes fuentes de material, por ejemplo botellas de cloro, jugo u otras, se utilizan en la fabricación de la misma pieza. Cada producto tiene su origen en varias empresas que se dedican a su fabricación, y provoca que contenga diferentes formulaciones, incluso del mismo producto, por ejemplo botellas.

Por lo tanto, la MPPR es un material heterogéneo, incluso en las mezclas más limpias y cuidadosas del material que se elija para su fabricación. Si se llegará a utilizar solo botellas del mismo producto y del mismo fabricante de polímero, la degradación del plástico puede presentar diferentes grados de una botella a otra, provocando una mezcla heterogénea.

También, según la empresa que se dedica a la recolección, limpieza y trituración (para elaborar hojuela) del PEAD reciclado, ofrece el material triturado con las etiquetas de las botellas, es decir, material con impurezas, como es el caso de la materia prima que utiliza Gysapol. Eliminar la etiqueta de las botellas agregaría un costo extra, lo cual puede provocar que los productos que se elaboran con este material aumenten su precio y no sea atractivo para el mercado.

Ahora sobre la cristalinidad²⁸ de la MPPR se puede decir que es muy difícil de encontrar, ya que la mezcla es heterogénea. Por lo tanto, no se pueden mejorar sus propiedades por medio de la tensión sobre las piezas fabricadas, como es posible hacerlo en PEAD virgen. Tensar una pieza fabricada con PEAD virgen alinea las cadenas poliméricas principales del material, provocando una resistencia mayor.

Para realizar un acercamiento al costo del material en comparación a la madera para la construcción de estructuras, resulta útil el ejercicio realizado por (G. Lampo & J. Nosker, 1997). Realizaron un proyecto y construcción de un puente peatonal fabricado con MPPR pero considerando su mejor propiedad, que es la resistencia a la compresión, para hacerlo trabajar tal y como el material tiene la capacidad. A la par se hizo un análisis del costo del mismo puente pero con madera natural. En los resultados encontrados en este ejercicio aventaja la MPPR sobre la madera natural en costos.

Por lo tanto, si se consideran las propiedades del MPPR como un material totalmente diferente a la madera, aprovechando su diferencia de comportamiento y propiedades únicas del material, es posible que pueda competir en el mercado contra la madera. Además, si se suma el resto de sus propiedades, como el bajo mantenimiento, resistencia a la intemperie, rechazo de plagas,

²⁸ Ver sección de Cristalinidad, página 19.

hidrofobia entre otras, se puede convertir en un mejor material para ciertas aplicaciones donde se le pueda sacar provecho. “En la mayoría de los casos, el fracaso de la aplicación de la MPPR aumenta con la falta de entendimiento sobre la diferencia de propiedades mecánicas entre la madera plástica y la madera natural.” (G. Lampo & J. Nosker, 1997, pág. 21).

Por último, es importante mencionar las recomendaciones para diseño de estructuras con este material que subrayan (G. Lampo & J. Nosker, 1997) y (K. A. Gopu & K. Seals) en cada uno de sus reportes.

En la investigación (K. A. Gopu & K. Seals) se recomienda un estudio riguroso de la fluencia del material, para ajustarlo con la rigidez a flexión. Combinando los valores se puede obtener la resistencia sin flexión por efecto de fluencia por carga y temperatura al mismo tiempo. Propone un método de cálculo para obtener la deformación de la pieza estructural por fluencia y esfuerzos a flexión, la cual será usada en la presente investigación.

También recomienda mejorar la mezcla de agregados de refuerzo como la fibra de vidrio, ya que las piezas que se fabrican con tal refuerzo resultan agresivas a la piel, provocando picor y enrojecimiento. La fibra de vidrio debe estar totalmente sellada para evitarlo. No es el caso del material que se utiliza para esta investigación.

En el estudio realizado por (R. Carroll, et al., 2003) sobre las propiedades estructurales de la madera plástica elaborada con material reciclado de Polietileno de Alta Densidad, la comparación que se hace de ésta con la madera natural es muy interesante de analizar, ya que las pruebas realizadas arrojaron resultados positivos, en algunas de ellas, para la madera plástica, y en otras la madera natural sobresale.

La intención de los autores del artículo científico citado fue la de probar las propiedades estructurales de una marca estadounidense de madera plástica, comparándola con las propiedades de la madera natural. Para ello se propuso una metodología de comprobación mediante pruebas mecánicas a dos diferentes temperaturas, por la importancia que tiene en el comportamiento del plástico.

Se trató de simular la temperatura que se alcanza en tiempos de frío con -23.3°C , y temporadas de calor con 40.6°C .

Los resultados de las pruebas fueron muy diferentes en ambas temperaturas, siendo la temperatura cálida la que afecta más al comportamiento mecánico del material.

La siguiente tabla muestra el resumen de los resultados encontrados en las pruebas.

	Madera natural	Madera plástica	
		-23.3°C	40.6°C
Resistencias a esfuerzos de compresión kg/m ²	193.743 – 275.319	528.204	116.246
Módulo kg/cm ²	81,577.296 – 112,168.782	17,335.175	2,753.234
Resistencias a esfuerzos de flexión kg/cm ²	407.880	373.210	90.141
Módulo kg/cm ²	81,577.296 – 112,168.782	22,535.728	5,098.581
Resistencias a esfuerzos de tensión kg/cm ²	407.88 – 540.441	206.999	117.265
Módulo kg/cm ²	81,577.296 – 112,168.782	19,272.636	4486.751
Resistencias a esfuerzos de cortante kg/cm ²	50.985 – 71.379	116.246	95.342

*Tabla 7: Resumen de resultados
 Elaboración propia con datos de (R. Carroll, et al., 2003)*

Como se puede corroborar en el artículo, los valores de resistencia encontrados a la temperatura fría fueron más estables, por lo tanto el material se comportó con mayor resistencia.

Cabe mencionar que las resistencias a esfuerzos de cortante que presentaron las piezas puestas a prueba fueron superiores a la media que las maderas logran soportar, esto genera un indicador de utilización estructural que se debe aprovechar.

La conclusión de los autores fue que la madera plástica probada tiene la capacidad de ser utilizada estructuralmente, sólo falta conocer cabalmente el comportamiento del material en todas las condiciones que pueda estar expuesto. Exponen que la falta de conocimiento sobre el material provoca la inseguridad para su uso como elementos portantes de alguna estructura. También agregan que los perfiles aplicados a un sistema estructural fabricado con este material serán de mayor tamaño que la madera natural.

Al analizar detenidamente el artículo científico se encontraron dos inconsistencias. La primera de ellas es que las pruebas que se realizaron fueron hechas a partir de los estándares del ASTM establecidas para la madera natural, sólo fueron modificadas para revisar el comportamiento del plástico a diferentes temperaturas. Sin embargo, para esa fecha, según la página web oficial del ASTM, ya existían pruebas bien reglamentadas dirigidas a la madera plástica desde el año 1997. No se comprende la razón que motivó la utilización de ese estándar.

La segunda consiste en que no se realizó la prueba de dilatación térmica, sin ella es imposible desarrollar un buen diseño estructural, ya que es necesario conocer ese valor para prever el comportamiento que tendrá al combinarlo con otras piezas estructurales. El plástico tiende a

dilatarse con facilidad al aumentar la temperatura, sin el coeficiente de dilatación térmica, es evidente, que el sistema diseñado no funcionará correctamente en las uniones.

En resumen, la investigación elaborada por (R. Carroll, et al., 2003) da pie a la continuidad del tema, para mejorar el conocimiento del material y encontrar las soluciones necesarias para cada una de los diseños estructurales que se presenten, además la madera plástica tiene las propiedades suficientes para trabajar como un elemento estructural.

Las recomendaciones que propone (G. Lampo & J. Nosker, 1997) son las siguientes:

- De ninguna manera se debe considerar a la MPPR como un material exactamente igual que la madera natural, ambos son materiales distintos.
- La fluencia del material es crítica.
- Las especificaciones del diseñador o ingeniero deben hacerse cuidadosamente cuando se utilicen en elementos a flexión.
- Cuando se utilice la MPPR para sustituir un diseño de madera natural es preciso reducir los claros entre apoyos en elementos que trabajen a flexión. A compresión pueden ser sustituidos tal y como el proyecto de madera natural presenta.
- El costo de productos hechos con MPPR y una variedad de elementos que trabajen a flexión es mayor al de la madera natural, sin embargo es necesario tener en cuenta las propiedades únicas del plástico como el bajo mantenimiento y el cero daño que provoca la intemperie y las plagas, además la reducción de basura en los tiraderos y rellenos sanitarios.
- Es necesario tomar ventaja de las propiedades a compresión de la madera plástica para bajar el costo de las estructuras que se construyan con este material.
- El coeficiente de expansión térmica de la MPPR es mayor al de la madera, por lo tanto es una propiedad que debe ser estudiada en la construcción de estructuras.

En resumen, lo establecido en las normas ASTM están respaldadas por las investigaciones elaboradas por (G. Lampo & J. Nosker, 1997), recalcando la recomendación de no utilizar la madera plástica en elementos que estén trabajando a tensión. La madera plástica no se debe considerar como sustituto directo de la madera natural. Las piezas que se fabriquen deben tener una geometría optimizada de acuerdo a la función que van a desempeñar, por lo tanto los perfiles comerciales de madera natural no pueden ser utilizados por la MPPR, este último debe tener sus propios perfiles de acuerdo a sus propiedades. La MPPR trabaja muy bien a compresión, se debe sacar provecho de esa propiedad al momento de diseñar estructuras con este material. Por último, se debe tener en cuenta que los esfuerzos de flexión provocan que

fluya el material, por lo tanto, si es necesario utilizarlo para recibir ese tipo de esfuerzos, es recomendable disminuir el claro que cubran las piezas, es decir, aumentar los apoyos.

2.3.2 Aditivos

En la producción de la madera plástica se utilizan con frecuencia tres aditivos que mejoran el producto terminado: agentes espumantes, estabilizadores UV, antioxidantes o estabilizadores de temperatura y retardantes de flama.

El primero de ellos, el agente espumante, que cambia la densidad del material producido. Con ello las piezas de madera plástica producidas son de menor peso que incluso el material virgen. También ayudan a que la mezcla sea homogénea tanto en color como densidad en toda su masa. Los espumantes pueden mejorar el procesamiento del plástico que se desea reciclar, haciendo más ligero el material fundido para extrusión o laminado.

El segundo aditivo es el estabilizador de Rayos Ultravioleta, UV. Su función es mantener el colorante de la madera plástica en buen esta por mucho más tiempo. La acción de los rayos solares en conjunto con los residuos de agua en el material cuando se utiliza en exteriores provoca el envejecimiento rápido de los tintes que se utilizan en la mezcla, lo cual genera decoloración.

Los antioxidantes o estabilizadores térmicos evitan que la madera plástica cambie drásticamente sus propiedades por acción de la temperatura, reduce los cambios de rigidez del material. Además, los antioxidantes se utilizan para mantener las propiedades de la madera plástica en bueno estado por mucho más tiempo.

Los retardantes de flama son los aditivos menos utilizados pero son muy importantes en sistemas estructurales. La combustión de la madera plástica se hace más complicada, resiste el calor sin producir flama por un periodo corto de tiempo, dejando integras las propiedades del material por ese espacio de tiempo, lo cual permite a los usuario desalojar el espacio antes de que colapse el material o se propague el incendio a otros espacios.

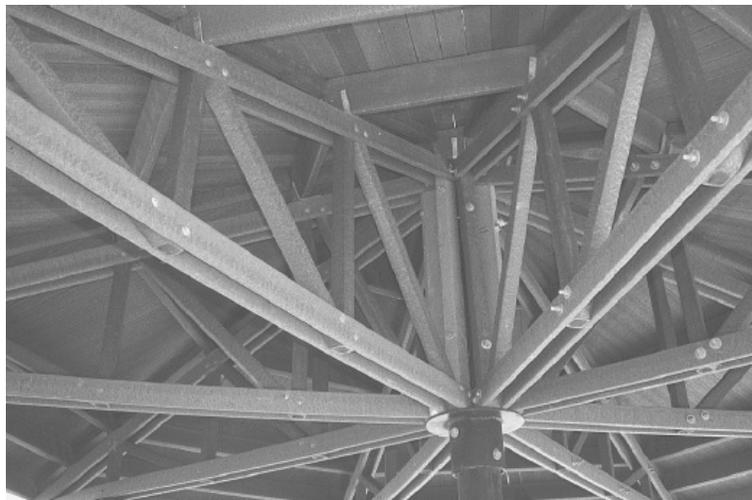
2.3.3 Métodos de procesamiento

La madera plástica de cualquier base de polímero se elabora principalmente con dos técnicas laminado y extruido por la dificultad que representa trabajar las hojuelas del plástico que se tritura y lava para su reciclado. En ambas técnicas es necesario aumentar la temperatura del material. En el caso de la extrusión el calor necesario para trabajar el plástico reciclado es mayor al del laminado, ya que es necesario que el material se encuentre en estado líquido para que sea capaz de pasar por el perfil metálico, en cambio en la técnica de laminado solo se necesita que el material fluya en las superficies exteriores para permitir la unión entre ellas al momento de ser prensado.

Existen otras técnicas de procesamiento de la madera plástica donde se incluyen fibras orientadas y se mezcla con otros materiales para mejorar sus propiedades según el propósito que se requiera cumplir. Este es el caso de la producción de madera plástica de (Vertech, 2013), la cual es capaz de utilizarse para exigencias de esfuerzos importantes, como las cargas a las que se somete un puente.

2.3.4 Métodos de conexión

Las conexiones que comúnmente se realizan en la madera plástica son a través de elementos metálicos como pernos, pijas y placas, debido a la resistencia que ofrecen al sujetarla. Son efectivos al transmitir esfuerzos a los demás elementos y además son capaces de eliminar esfuerzos no deseados en las piezas principales.



*Ilustración 12: Detalle de uniones en la cubierta de un mirador
(G. Lampo & J. Nosker, 1997, pág. 76)*

En la imagen superior se puede observar el método de conexión que se utilizó en el muelle de Tiffany, ubicado en Nueva York. La parte central recibe todos los esfuerzos provocados por el peso propio y cargas accidentales de la cubierta. Estos esfuerzos son transmitidos a la columna por medio de una conexión metálica de forma circular que se sujeta firmemente por medio de tornillos y tuercas tanto a la columna como a las armaduras fabricadas con madera plástica. También se puede observar que las vigas inferiores están formadas por pares de perfiles, los cuales se conectan por medio de tornillos, tuercas y rondanas. Todos los elementos utilizados para conectar una pieza con otra son de acero.



*Ilustración 13: Puente fabricado con madera plástica reforzada
(Krishnaswamy & Lampo, 2001)*

El puente construido en el año 2001 con madera plástica reforzada con fibra de vidrio por la Universidad de Rutgers, Estados Unidos, es un ejemplo de creatividad en el desarrollo de conexiones y transmisión de esfuerzos con elementos metálicos. La ilustración 13 muestra el diseño general del puente, contemplado para soportar vehículos de carga pesada.



*Ilustración 14: Detalle de placa con varilla
(McLaren Engineering Group, 2003, pág. 55)*

En este puente se utilizaron las conexiones para transmitir la mayoría de los esfuerzos a los arcos principales de apoyo, para ello se utilizaron varillas de acero inoxidable que se conectaron a las vigas longitudinales y al arco principal por medio de placas que sujetan las piezas de madera plástica con las varillas, que funcionan como tensores. Se utilizaron tuercas y varillas roscadas para establecer la conexión entre ambos elementos del puente.



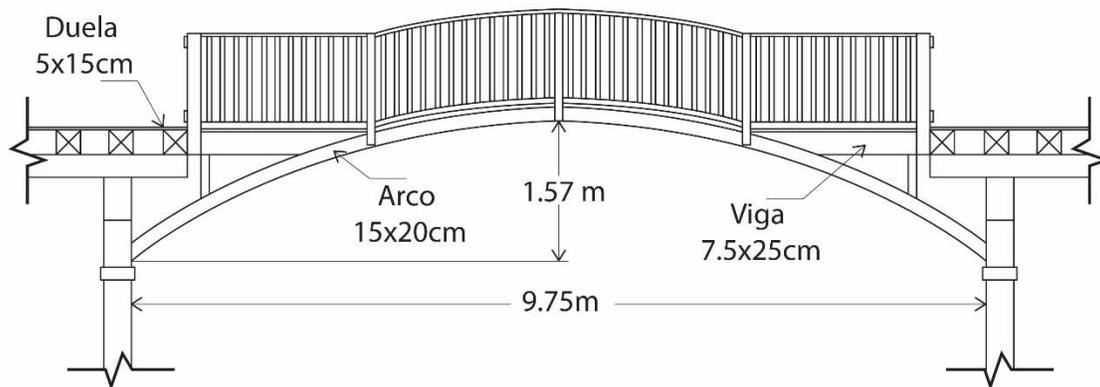
*Ilustración 15: Detalle de vigas principales
(McLaren Engineering Group, 2003, pág. 61)*

En la ilustración 14 se puede observar que los tornillos que sujetan la serie de tablonces de madera plástica que se utilizaron para formar los arcos pasan a través de toda la sección hasta sujetar una placa de conexión en forma de ángulo que se encuentra debajo del arco, la cual conecta la columna con el arco. Ambas puntas de los tornillos están sujetadas por medio de tuercas y rondanas. Los tornillos que pasan a través de toda la sección del arco tienen una doble función: mantener unidos los tablonces que conforman el arco y conectar las columnas con el arco.

En la ilustración 15 se observa que las vigas longitudinales no están fabricadas de una sola pieza, están unidas para generar una viga continua. Esta conexión se realiza por medio de un par de placas metálicas, una por cada cara lateral de la viga. Se utilizan 8 tornillos en total que pasan a través de la viga y de las placas de acero, y se sujetan por medio de rondanas y tuercas. Cabe señalar que el ancho de la placa metálica cubre la cara lateral de la sección.

Hubo algunas conexiones que no fue necesario utilizar placas metálicas, como es el caso de la conexión entre las vigas transversales y la diagonal de conexión de la columna (ilustración 15). En esta conexión solo se utilizó un tornillo pasado sujetado por tuercas y rondanas, seguramente se decidió por solo un tornillo porque la conexión no recibe una carga considerable.

Otra conexión que resalta es la que se observa en la parte inferior de la viga longitudinal que sujeta el tensor por la placa de conexión que ahí se ubica (ver ilustración 15). Lo peculiar de esta conexión es el uso de ángulos para transmitir los esfuerzos provocados por los tensores a las placas. Los ángulos corrigen la dirección del esfuerzo oblicuo de los tensores a un esfuerzo perpendicular sobre las placas de conexión.



*Ilustración 16: Puente peatonal
(G. Lampo & J. Nosker, 1997, pág. 67)*

La ilustración 16 muestra el diseño de un puente peatonal fabricado en 1996 con madera plástica reciclada y reforzada con fibra de vidrio en la ciudad de Nueva York. La información que se expone en el artículo de la investigación de (G. Lampo & J. Nosker, 1997) sobre este puente solo se comenta el uso de clavos de diferentes radios. Las cantidades también varían. Los clavos son de acero inoxidable. El uso de los clavos se debe a las bajas cargas que puede presentar un puente de estas características. Cabe señalar que este puente falló en los arcos de apoyo y por eso se demolió.

2.3.5 Aplicaciones

La madera plástica se puede trabajar con las mismas herramientas que la madera natural, es decir, puede ser serruchada, clavada, moldurada, etc. Los cortes que se realizan con estas herramientas resultan tan limpios como en la madera natural, que con solo lijar suavemente se consigue un acabado fino al corte. Los clavos los recibe bien pero no tienen la misma fuerza de sujeción que en la madera, por tal motivo se recomienda utilizar pijas.

Según la empresa fabricante, puede tener acabados similares a la madera natural o simplemente un color sólido. Se ha escrito sobre algunas empresas fabricantes del material en el capítulo: “El plástico reciclado en la arquitectura”.

La madera plástica con acabado de madera es aplicada, la mayoría de las veces, en suelos para simular duelas, pero en especial en terrazas, donde la acción de la intemperie puede deteriorar la madera natural, la cual está expuesta no sólo a los rayos del sol y la lluvia, sino a plagas que van destruyendo la madera poco a poco. Esta es la principal razón que los clientes y constructores prefieren utilizar, cada día más, la madera plástica.

Su aplicación no sólo se limita a los suelos, aunque es una de las más importantes, sino también es utilizada para construir cercas, así como material ornamental de fachadas, ya que simulan, visualmente, la apariencia de la madera natural, pero con las ventajas antes mencionadas.

También se construyen casas para perros, mobiliario urbano, mobiliario para el hogar, para oficina, cielos falsos, o simplemente recubrimientos de muros u otros elementos arquitectónicos para generar ambientes naturales.

Se pueden encontrar en espacios de jardines, utilizados como pérgolas para sombrear parcialmente un espacio. El acabado logra integrarse en el entorno natural que la arquitectura de jardines ofrece.

Ahora bien, las piezas que son elaboradas con color sólido también pueden ser aplicadas en las mismas funciones que las anteriores, ya que poseen propiedades similares, sin embargo las aplicaciones están dirigidas a elementos que no sea muy necesaria la apariencia similar a la madera natural, por ejemplo en la construcción de recubrimientos para techos como tejas, ya que son capaces de resistir la intemperie y a la vez impermeabilizar de forma efectiva la superficie.

La plasti-madera de color sólido también puede funcionar como cimbra para colar concreto. Su durabilidad es mucho mayor que la madera natural, porque es muy resistente a la humedad y a las cargas mecánicas que se pueda exponer al trabajar de esa manera.

Otros usos fuera de la arquitectura que se le pueden dar a este producto son: tarimas, pallets, para transportación y amacénaje; pisos y redilas para automotores de carga; señalizaciones como topes, líneas divisorias, protectores de columnas, reductores de velocidad, boyas, protectores de carreteras y postes de derecho de vía.

Los decks para lagos, también pueden ser contruidos con estos materiales, dependiendo del diseño, se puede elegir entre los colores sólidos o las impresiones que simulan madera natural. Son resistentes a la humedad, no generan plagas, requieren un mínimo de mantenimiento, posee larga durabilidad, el color está integrado a la pieza y es completamente ecológico, porque principalmente están fabricados con materiales plásticos reciclados y se ahorra la utilización de la madera.

Lamentablemente, la aplicación de estos productos en elementos estructurales, al menos en México no está estudiado cabalmente. Por esa razón se titubea al plantear proyectos que utilicen el material como elementos portantes. Sin embargo, el ASTM (American Society for Testing and Materials) creó una estandarización para productos de madera plástica de polietileno, tanto reciclado como virgen y reforzado para usos estructurales, donde se especifican las propiedades mínimas que deben tener, específicamente para exteriores.

La norma tiene el código D7568 y fue elaborada por primera vez en el año de 2012. Fue publicada una versión más reciente apenas en el año 2013.

Esto último atisba la idea de que la tecnología en la producción de la madera plástica se ha desarrollado a tal grado que ahora es confiable utilizarla, bajo ciertos requerimientos, en elementos portantes, con seguridad. Conociendo el comportamiento mecánico y térmico del material, es posible definir sus alcances y factibilidad para trabajar como estructura.

En el país existen varias empresas que se dedican a fabricar madera plástica y otras tantas dedicadas solo a distribuir el producto proveniente de otros países.

El desarrollo del proyecto de investigación está dirigido a la utilización del PEAD reciclado para la construcción de cubiertas, por las razones que se han venido exponiendo a lo largo de este documento. Por ello se ha elegido una empresa en particular ya que produce la madera plástica adecuada que cumple con lo investigado. Esta empresa es de origen mexicano.

3. Propiedades de la MPPR de la empresa mexicana

3.1. Introducción

Se investigan las capacidades estructurales de la madera plástica producida por una empresa mexicana, la cual es sometida a una serie de experimentos para conocer dos tipos de propiedades: mecánicas y térmicas. Dichas propiedades son necesarias para desarrollar un modelo teórico de una estructura donde se analiza el comportamiento del material en una serie de condiciones dadas, con el objetivo de validar o rechazar la hipótesis: La madera plástica de PEAD reciclado elaborada en México puede ser considerado como material portante mediante el desarrollo de un sistema estructural que potencialice sus propiedades mecánicas.

El análisis de las propiedades del PEAD, otros tipos de madera plástica y el equipo con el que se contó para realizar la investigación arroja que las pruebas de laboratorio necesarias para alcanzar los objetivos son las siguientes:

1. Comportamiento mecánico bajo esfuerzos de **compresión**
2. Comportamiento mecánico bajo esfuerzos de **tensión**
3. Comportamiento mecánico bajo esfuerzos de **flexión**
4. Determinación del coeficiente de expansión térmica lineal
5. Densidad y peso específico

Los métodos que se utilizan para observar y analizar las propiedades son los sugeridos por las normas de la ASTM, elaborados específicamente para la madera plástica.

Además, a partir de las propiedades obtenidas con las pruebas, se calcula la estructura con base en la norma ASTM D7568-13, que propone un método de cálculo estructural para asegurar que el sistema cuente con el análisis completo de predicción de resistencia para soportar un sistema estructural.

Con el apoyo del software SAP2000 se obtienen las cargas que resisten cada uno de los elementos. Por último se determinan las secciones y se analizan los resultados que generan las conclusiones finales de la investigación.

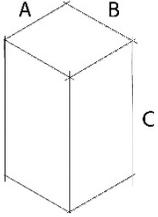
3.2 Prueba de compresión

3.2.1 Procedimiento

Se utiliza la norma con la clave D6108-03.

Las probetas que se utilizan fueron fabricadas en la misma corrida. Corresponden al producto producido con PEAD reciclado, aditivos de protección UV y colorante blanco que ofrece la empresa en su catálogo.

Las probetas tienen una sección aproximada de 10 x 10 cm y un largo de 20cm. Se cuida que cada uno de los cortes sea perpendicular al flujo, es decir, a la dirección de la extrusión. A continuación se miden las probetas en tres puntos por lado para obtener un promedio de cada dimensión; se realiza de esta manera porque la sección de los perfiles de madera plástica, comúnmente, presentan irregularidades.



	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5
A (cm)	9.77	10.07	10.10	9.63	9.87
B (cm)	10.03	9.67	9.67	9.97	9.73
C (cm)	20.03	20.05	20.00	20.05	19.95
Sección (cm ²)	97.99	97.31	97.63	96.01	96.04

Tabla 8: Dimensiones de las probetas

La tabla anterior recolecta las dimensiones promedio de las probetas. También se marcan con un número con tinta indeleble para identificarlas.

La serie de probetas se someten a las mismas condiciones, a una temperatura de 22.7°C, en una máquina universal SATEC systems, Inc, tipo UTM, modelo MII 400WMVL, con número de serie 1064, hecha en Estados Unidos, que pertenece al Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. El encargado del laboratorio es el M.I. Héctor Javier Guzmán Olgún, quien supervisa el correcto procedimiento de la prueba.

Los platos de la máquina se colocan sobre la superficie de las probetas asegurando que hagan contacto, después se establece una pre-carga de 500 kgf para ajustar los platos sobre las probetas y por último se programa la máquina para que se desplace constantemente a 0.03 mm/mm*min, es decir 6 mm/min.

Una vez de que los ensayos se realizaron se procede a procesar los datos arrojados como se explica en los siguientes párrafos.

La Resistencia a la Compresión se realiza a partir del esfuerzo que resistió la probeta en el punto de fractura o al momento de alcanzar el 3% de deformación mediante la siguiente expresión:

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

Ecuación 1

Donde:

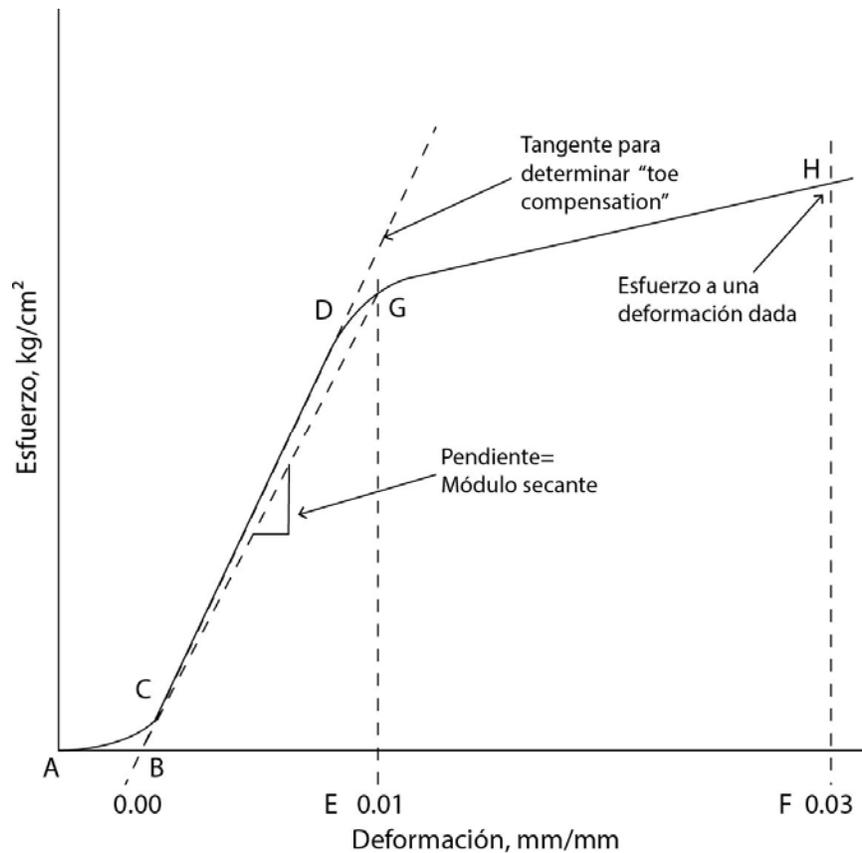
σ = Esfuerzo (kg/cm²)

P = Carga axial a compresión (kgf)

A = Área de la superficie que recibe el esfuerzo (cm²)

Este valor se utiliza para conocer la resistencia última a un esfuerzo a compresión, el cual será utilizado para el cálculo de la sección resistente de cada una de las piezas a utilizar en el sistema.

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 y se obtiene como indica la siguiente gráfica:



Gráfica 1: Gráfica esfuerzo-deformación usual en la madera plástica
(ASTM D6108-03, 2003)

Cualquier punto tomado de la línea CD puede utilizarse para obtener el Módulo de Elasticidad dividiendo el esfuerzo entre la deformación del punto elegido, el resultado será expresado en kg/cm².

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}$$

Ecuación 2

Donde:

- E= Módulo de elasticidad (kg/cm²)
- σ_2 = Esfuerzo al punto mayor de la recta (kg/cm²)
- σ_1 = Esfuerzo al punto menor de la recta (kg/cm²)
- ε_2 = Deformación unitaria mayor de la recta (mm/mm)
- ε_1 = Deformación unitaria menor de la recta (mm/mm)

El punto B es el cero real de la deformación. Lo que existe antes del punto se desprecia por el acoplamiento que realizan los platos en las superficies de la sección de la probeta donde hacen el esfuerzo, por lo tanto se obtiene la deformación real a partir del ese punto, hasta llegar al 0.03 mm/mm de la deformación.

El Módulo Secante se obtiene trazando una línea perpendicular a la deformación 0.01, de lo cual se obtiene el punto G. A partir de ese punto se traza otra línea hacia el punto B (el cero real), y la pendiente producida por esos dos puntos será igual al Módulo Secante: *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 el 0.03 mm/mm, punto H.

Calcular el promedio de cada uno de los valores obtenidos de ellas y aplicar el cálculo de desviación estimada como sigue:

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

Ecuación 3

Donde:

- s= Desviación estándar estimada
- X= Valor de una simple observación
- n= Número de observaciones
- \bar{X} = Promedio del grupo de observaciones

3.2.2 Resultados

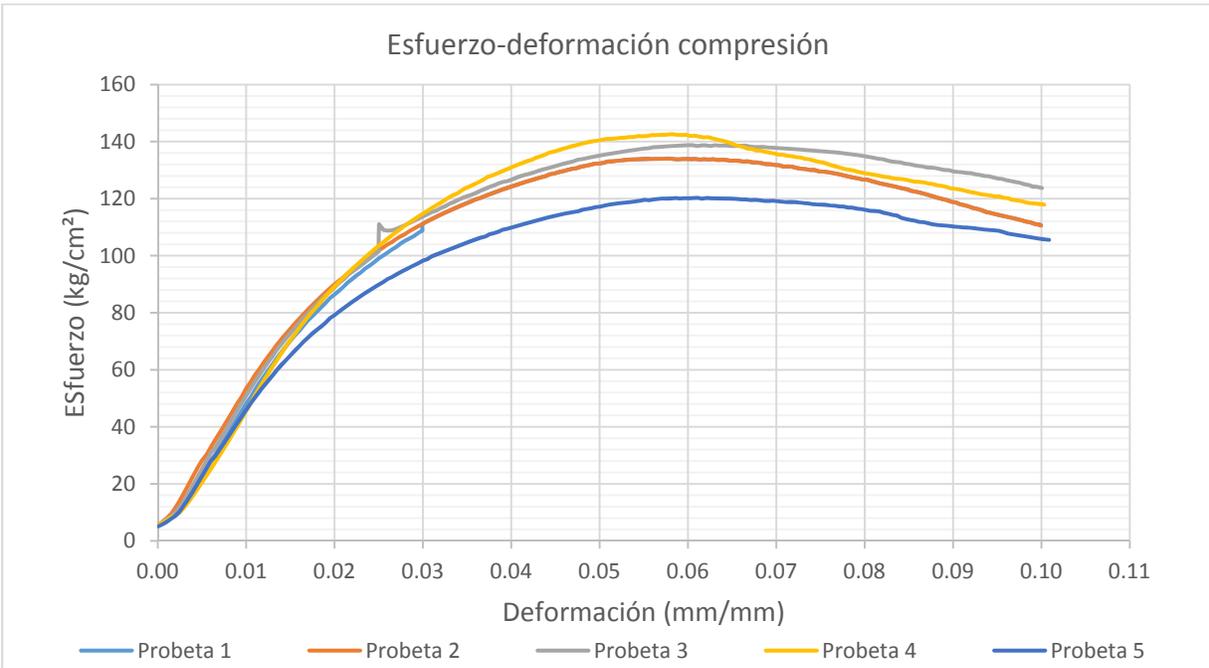
Al principio se estableció, así como la norma correspondiente indica, detener la prueba al alcanzar una deformación unitaria de 0.03 mm/mm, sin embargo se decide hacerlo hasta llegar al 0.1 mm/mm porque no se encuentra el esfuerzo máximo en la primera deformación, por lo tanto la curva de la probeta 1 termina al 0.03 mm/mm y el resto hasta el 0.1 mm/mm, con ello es posible observar el esfuerzo máximo y la reducción del esfuerzo resistente con claridad.

Los resultados mostraron que el material tiene un módulo de elasticidad de 4836.26 kg/cm² en promedio y un esfuerzo máximo de 132.13 kg/cm². Se deduce que el esfuerzo máximo promedio puede considerarse como válido aunque solo se tengan cuatro resultados, porque la desviación estándar calculada, 7.00 kg/cm², y el coeficiente de variación del 5.3% son valores estadísticos muy bajos que demuestran la existencia de elementos suficientes para afirmarlo.

Las curvas de esfuerzo-deformación comienzan a partir de 500 kgf por el pre-esfuerzo que se le aplica. Se decide mantener la gráfica de esa manera al analizar que la pendiente de la línea del módulo de elasticidad indica una dirección hacia el origen, por lo tanto no es necesario cambiar el gráfico, ya que los resultados no varían si se corrigiera la curva.

	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación
Módulo elástico (kg/cm ²)	4714.11	5435.83	5040.22	4464.05	4527.11	4836.26	360.58	7.46
Módulo secante 1% (kg/cm ²)	4786.32	5344.39	5092.10	4573.15	4573.15	4873.82	302.50	6.21
Esfuerzo a una deformación dada 3% (kg/cm ²)	108.82	111.95	113.79	115.53	98.80	109.78	5.92	5.40
Esfuerzo límite elástico (kg/cm ²)	70.14	70.59	62.78	70.13	59.94	66.71	4.47	6.70
Esfuerzo máximo (kg/cm ²)	-	134.01	138.11	136.14	120.26	132.13	7.00	5.30

Tabla 9: Resultados de la prueba de compresión



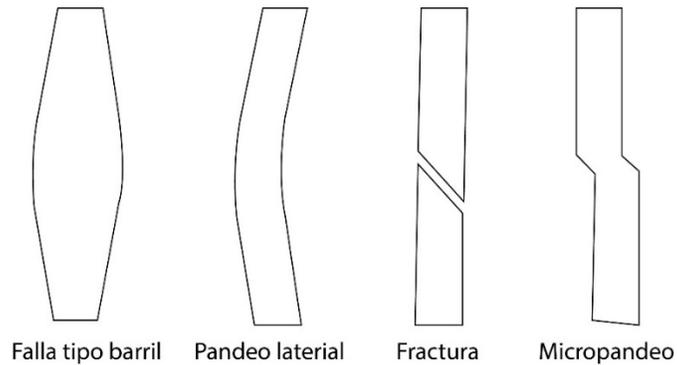
Gráfica 6: Gráfica esfuerzo-deformación compresión

Las probetas presentaron un comportamiento elástico hasta un esfuerzo promedio de 66.7 kg/cm² a partir de ese esfuerzo comenzó con un comportamiento plástico amplio hasta llegar al esfuerzo máximo que dejó mostrar cambios importantes y visibles en las probetas. Se presentó en todas las probetas aumento de volumen en puntos específicos ubicados en la parte baja de las mismas con una forma irregular pero con tendencia horizontal.



Ilustración 17: Deformación de la probeta 4

Como se puede observar en la Ilustración 1 la deformación de la probeta no es regular por lo tanto no se puede ubicar en alguno de los cuatro tipos de falla que la norma correspondiente establece, pero se puede decir que tiene un acercamiento a la falla de tipo barril en algunas zonas aisladas. El aumento de volumen se dio hasta presentar fracturas en las fibras exteriores de las superficies afectadas.



*Ilustración 18: Tipo de falla por compresión
(Norma ASTM D6108-03, pag. 4)*

3.2.3 Conclusiones

El material tiene una deformación elástica pequeña, la zona que corresponde a dicha deformación termina, aproximadamente, al 0.012 mm/mm, sin embargo a partir de ese punto la resistencia del material aumenta desaceleradamente hasta alcanzar el esfuerzo máximo para después decrecer aceleradamente.

La zona de la curva que se describe se puede dividir en dos zonas más, la primera es la deformación viscoelástica (deformación transitoria con regreso lento), que se puede observar hasta el 0.03 mm/mm aproximadamente; la segunda zona es la deformación plástica, es decir la deformación permanente.

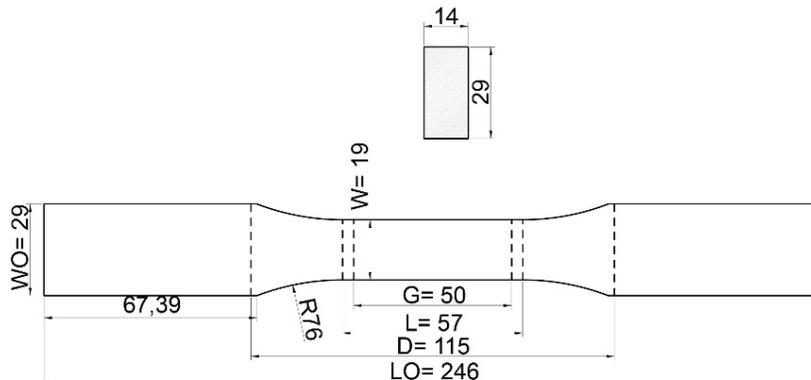
El esfuerzo a una deformación dada es de 109.78 kg/cm², por lo tanto la cantidad de esfuerzo que puede resistir sin deformarse permanentemente es considerable para utilizarse en un sistema estructural.

3.3 Prueba de tensión

3.3.1 Procedimiento

Es importante señalar que en las normas ASTM diseñadas para madera plástica no existe una para obtener las propiedades de tensión del material, porque el comité encargado de realizarlas no permite que sea utilizado en esa clase esfuerzos, por razones del comportamiento del plástico reciclado, sin embargo es necesario conocer sus propiedades de tensión porque las exige el comportamiento del sistema estructural que se propone. Por dicha razón se toma de base la norma para plásticos vírgenes de la ASTM (norma D638-03) para obtener las propiedades de tensión del material ya que considera en las especificaciones plásticos rígidos, semirrígidos, no rígidos y compuestos reforzados.

La norma establece cinco tipos de probetas, las cuales se analizaron y se llegó a la conclusión que se debe utilizar el tipo III, que pertenece al tipo de probeta con mayor tamaño (ver ilustración). Se tomó esa decisión porque el material presenta imperfecciones aleatorias en el interior de las piezas extruidas, y teniendo probetas de mayor tamaño aumenta la probabilidad de obtener mejor las propiedades de tensión que representen mejor al material. Se realizan un total de cinco probetas para la prueba.



*Ilustración 19: Probeta Tipo III para tensión
(ASTM International, 2003, pág. 4)*

Se analiza el contenido de la tabla 1 de la norma ASTM correspondiente en donde se establecen las velocidades por cada tipo de probeta, el tipo III requiere una velocidad de 5 mm/min con una tolerancia de $\pm 25\%$ (1.25 mm/min).



Ilustración 20: Probeta número 3 ensayada

El total de las probetas son recortadas por medio de un router²⁹ de mano y una cierra cinta. Para realizar el recorte se hizo una plantilla de madera natural elaborada a partir de un dibujo con las medidas precisas de las probetas, por ello se garantizan las mismas dimensiones todas las probetas. El material tomado para realizarlas es el perfil de 10 x 10 de madera plástica color café que está constituido, principalmente por PEAD reciclado, es decir, tiene las mismas características que el material usado en el anterior ensayo.

Los serie de ensayos se realizan en el Laboratorio de materiales del Instituto de Ingeniería de Materiales y son supervisados por el I.Q. Ernesto Sánchez, encargado de dicho laboratorio; el laboratorio cuenta con dos máquinas universales para ensayos de escala menor y la que se utiliza para la prueba es la Instron 5500R modelo 1125, con una capacidad de 10 toneladas.

Se utilizan los sujetadores especializados para el tipo de probetas y se asegura que cada una de ellas es debidamente colocada en la máquina con el fin de realizar los ensayos con precisión. Por último, el día de la prueba, el laboratorio mantenía una temperatura de 22.4 °C.

Antes de comenzar los ensayos, se miden las probetas con un calibrador para obtener las dimensiones precisas de ancho y grueso de cada una. A continuación, se programa la máquina a la velocidad antes mencionada y con una cantidad de un registro por segundo para el trazo de la curva esfuerzo-deformación.

Al finalizar las pruebas, los datos se procesan para obtener los mismos datos que la prueba de compresión e incluso se utilizan las ecuaciones 1, 2, y 3 de la misma para generar la información necesaria, así como la gráfica para obtener el resto de la información.

²⁹ Herramienta eléctrica de carpintería para realizar recortes y desvastes de madera.

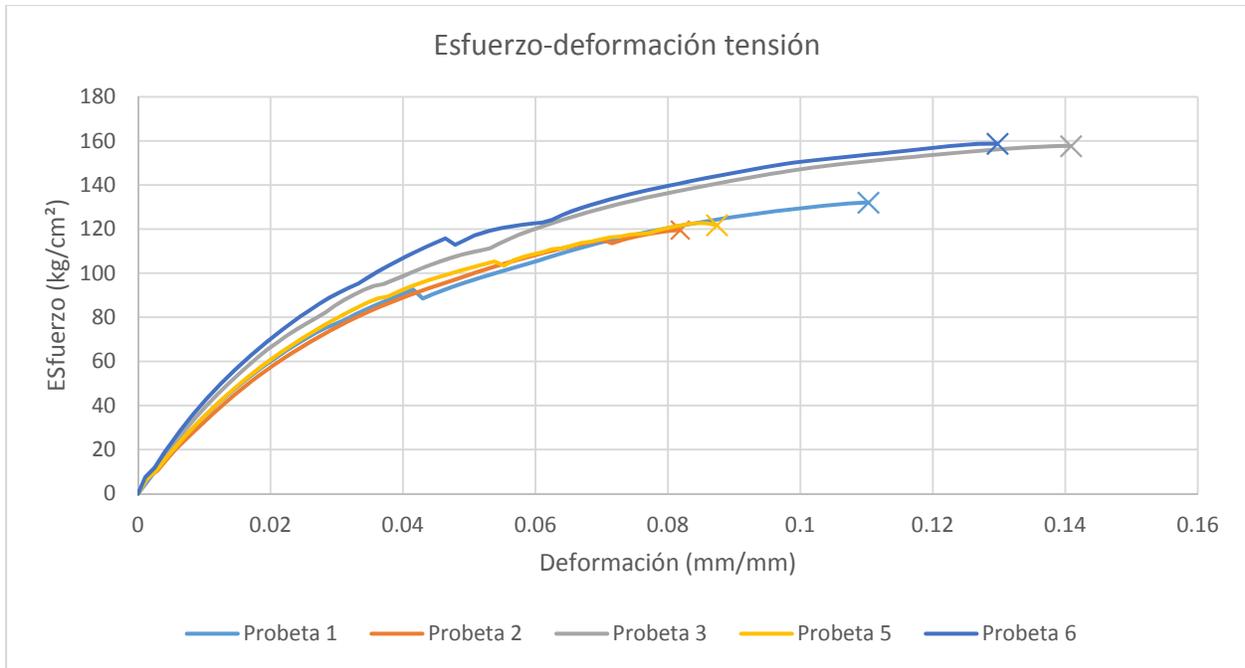
3.3.2 Resultados

Todos los ensayos corrieron con normalidad excepto la probeta 4. Este ensayo se realizó en dos ocasiones debido al deslizamiento que tuvo lugar en el sujetador superior, provocando registros falsos sobre el esfuerzo que recibió, por ello se repitió el ensayo, sin embargo los resultados del mismo se alejaron mucho del resto; al final se decidió eliminar el ensayo en el análisis de los resultados.

	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 5	Probeta 6	Promedio	Desviación estándar	Coficiente de variación (%)
Módulo elástico (kg/cm ²)	3682.83	3578.83	4092.89	3809.07	4670.45	3966.82	391.68	9.87
Módulo secante (kg/cm ²)	3458.03	3240.42	3837.51	3430.33	4078.33	3608.92	304.32	8.43
Esfuerzo a una deformación dada (kg/cm ²)	78.95	76.56	87.95	80.18	91.17	82.96	5.61	6.76
Esfuerzo límite elástico (kg/cm ²)	33.15	24.75	36.45	25.74	30.80	30.18	4.42	14.66
Esfuerzo máximo (kg/cm ²)	132.04	119.58	157.66	122.68	158.71	138.13	16.88	12.22
Esfuerzo a ruptura (kg/cm ²)	130.38	119.58	126.48	121.78	146.69	128.98	9.61	7.45
Deformación a ruptura (mm/mm)	0.11	0.08	0.15	0.09	0.14	0.11	0.03	

Tabla 10: Resultados de la prueba de tensión

La tabla 3 muestra los resultados de cada una de las probetas teniendo como resultados principales el módulo elástico con 3966.82 kg/cm² y el esfuerzo máximo con 138.13 kg/cm². El material se comporta similar a tensión y a compresión pero con una variante importante, el esfuerzo límite elástico, aproximadamente 50% menor en tensión que en compresión.



Gráfica 7: Gráfica esfuerzo-deformación tensión

Las probetas 1 y 6 presentaron una imperfección en el registro de datos, cercano a la deformación 0.05 mm/mm, la cual se presume es provocada por la falta de uniformidad del material, es decir, la densidad varía por la cantidad de porosidades, por lo tanto se deduce que la imperfección en la curva se produce por una micro-fractura en la zona de la probeta con menor densidad. Además, teniendo en cuenta que sucede aproximadamente en la misma deformación, se llega a la conclusión que dichas probetas fueron cortadas exactamente de la misma zona del perfil.

La fractura en las probetas ocurrió de distintas maneras y en distintos puntos, como se puede corroborar en la gráfica 2, sin embargo es posible deducir una tendencia a fracturarse cerca del sujetador inferior y diagonalmente. Es importante señalar que algunas probetas no fracturaron exactamente como se describe, sino que presentaron una línea horizontal con la consecuente separación de una serie de fibras que corresponden a las superficies frontales de las mismas.



Ilustración 21: Fractura de las probetas

La ilustración anterior muestra cómo se sujeta la probeta en la máquina, así como la manera en que fractura el material al esfuerzo recibido. Se pueden observar en los laterales de los sujetadores de la máquina el tornillo que se utiliza para presionar con seguridad la probeta.

La siguiente ilustración muestra la falta de uniformidad tan clara que puede tener la madera plástica en el interior de una pieza extruida. La formación de burbujas es un problema que es complicado de resolver por la cantidad de impurezas que puede llevar la mezcla trabajada.



Ilustración 22: Imperfecciones de la madera plástica ensayada

3.3.3 Conclusiones

La curva esfuerzo-deformación de cada una de las probetas marca una tendencia clara en cuanto al comportamiento plástico del material. Es evidente que la zona plástica es muy amplia, por lo tanto genera una deformación que aumenta desaceleradamente.

Es complicado definir el momento donde termina la zona viscoelástica del material por lo prolongado de la zona plástica, sin embargo se puede establecer un acercamiento a una deformación de 0.03%. Ocurre en promedio a un esfuerzo de 82.96 kg/cm².

La irregularidad de las probetas confirma la necesidad de realizar las pruebas sólo con perfiles intactos, es decir, con perfiles sin cortar para que resulten valores confiables para el cálculo estructural. En los ensayos elaborados se produjo una variación considerable entre cada una de las probetas, todos los datos calculados variaron más del 5%, por lo tanto se debe desarrollar un procedimiento para la prueba que permita conocer mejor el comportamiento a tensión del material.

A partir de la gráfica esfuerzo deformación se comprende la razón por la cual el comité encargado de realizar las normas ASTM para la madera plástica aconseja evitar el esfuerzo a tensión del material: la madera plástica desarrolla una deformación importante al momento de recibir un esfuerzo a tensión, lo cual provocaría debilitamiento del sistema estructural que integre, por lo que se recomienda evitar dicho esfuerzo.

3.4 Prueba de flexión

3.4.1 Procedimiento

Con base en la norma ASTM D6109-03 se define el procedimiento a seguir para la realización de la prueba de flexión. La norma establece que se deben de realizar un total de cinco ensayos por material, sin embargo para calcular la fluencia del material con respecto a la norma ASTM D7568-13 es necesario realizar un total de diez ensayos, cinco a una velocidad lenta y otros cinco a una velocidad rápida.

Se preparan las diez probetas de acuerdo a la norma que exige un largo igual a 16 veces la profundidad de la sección con una tolerancia de +4 y -2, además se agrega 10% por cada lado para dejar que la pieza sobresalga del claro de soporte y no permita que la pieza resbale de los apoyos. El soporte que se utiliza para la prueba es fijo, no permite una dimensión de claro distinta a 71 cm, por lo tanto, a partir de la norma y el equipo se define el tamaño de las probetas: 5cm x 5cm x 86cm.

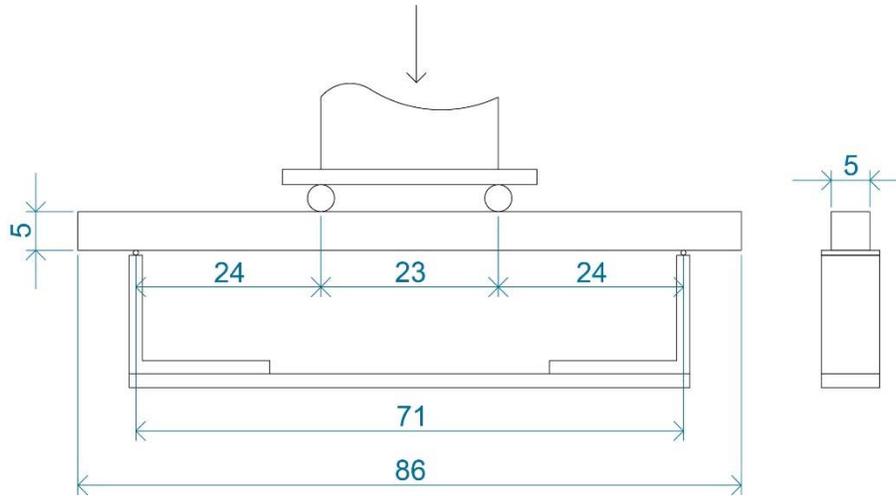


Ilustración 23: Disposición del equipo para la prueba de flexión

La norma indica que se debe realizar la prueba a los tercios del claro, por lo tanto se acomoda el equipo lo más cercano a esa indicación. La prueba se realiza con esa proporción para provocar que la pieza que es ensayada produzca una zona de esfuerzo a flexión pura en el centro. Lamentablemente no fue posible ubicar los puntos de carga justo a los tercios por las limitaciones del equipo. La ilustración anterior muestra la ubicación tanto de los apoyos como de los puntos de carga.

Una vez que se coloca la probeta en el equipo y con la seguridad de que se encuentra en su correcta posición se procede a realizar la programación de la máquina. Primero se establecen los registros, uno por segundo, enseguida se define la velocidad del ensayo por medio de la siguiente expresión:

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

Ecuación 4

Donde:

R= Velocidad de aplicación de la carga, mm/min

L= Claro de soporte, mm.

d= Profundidad de la viga, mm

Z= Promedio de deformación de las fibras exteriores mm/mm/min. Z debe ser igual a 0.03.

La velocidad no debe ser mayor o menor al 50% del resultado de la expresión. El resultado es de 55.95 mm/min.

La serie de probetas se someten a las mismas condiciones, a una temperatura de 22.4°C, en una máquina universal SATEC systems, Inc, tipo UTM, modelo MII 400WMVL, con número de serie 1064, hecha en Estados Unidos, que pertenece al Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. El encargado del laboratorio es el M.I. Héctor Javier Guzmán Olgúin, quien

supervisa el correcto procedimiento de la prueba.

Se procede a iniciar la prueba y se registran por segundo el esfuerzo y deformación que se están desarrollando para generar la curva correspondiente de esfuerzo-deformación. Si la fractura no ocurre antes de:

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

Ecuación 5

Donde:

- D= deflexión al centro de la probeta (mm)
- r= velocidad de deformación (mm/mm/min)
- L= longitud del claro (mm)
- d= profundidad de la probeta (mm)

Es decir 45.4 mm, el método no puede definir la resistencia real del material, pero es posible realizar un acercamiento.

Al terminar los ensayos, la serie de datos es procesada para generar la información que se necesita para establecer las propiedades del material en un esfuerzo a flexión. Primero se calcula la deformación del material a cada segundo en las fibras exteriores con la siguiente expresión:

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

Ecuación 6

Donde:

- r= deformación (mm/mm)
- D= deflexión al centro de la probeta (mm)
- d= profundidad de la probeta (mm)
- L= longitud del claro (mm)

La expresión anterior también se utiliza para encontrar la deformación al momento de ruptura cuando se sustituye D por el valor encontrado en la ecuación 5.

Enseguida se procede a calcular el esfuerzo que se produce en las fibras exteriores de la probeta a cada segundo registrado por medio de la ecuación 7:

$$s = \frac{PL}{bd^2}$$

Ecuación 7

Donde:

- S= esfuerzo
- P= carga concentrada sobre la probeta (kgf)
- L= longitud del claro (mm)
- b= ancho de la probeta (mm)
- d= profundidad de la probeta (mm)

A continuación se calcula el modulo secante al 1% de deformación, el cual se obtiene como sigue:

$$E_B = 0.21L^3 \frac{m}{bd^3}$$

Ecuación 8

Donde:

- E_B = módulo secante (kg/cm²)
- m= pendiente al 1% de deformación³⁰ (kg/cm²)
- L= longitud del claro (mm)
- b= Ancho de la probeta (mm)
- d= Profundidad de la probeta (mm)

En esta prueba también es necesario calcular la desviación estándar por medio de la ecuación 3.

Por último, con la información procesada se elaboran las gráficas de esfuerzo-deformación de cada una de las probetas ensayadas y se analiza cada zona de la curva generada.

3.4.2 Resultados

Se presentan algunas complicaciones para realizar la prueba de acuerdo al procedimiento que establece la norma correspondiente. La primera complicación son las limitaciones de velocidad de la máquina universal con la que se trabaja. La velocidad más baja que puede soportar no es suficiente para alcanzar la velocidad lenta, por lo tanto se omite el ensayo. La segunda complicación se produjo por el deslizamiento de las probetas sobre los soportes finos (ilustración 3), por ello se procede a cambiar los soportes por unos articulados para minimizar el movimiento; no produjo resultados satisfactorios hasta que se comienza a variar la velocidad calculada, la cual se fija finalmente a 40 mm/min, todavía dentro de lo permitido por la norma.

³⁰ Ver gráfica explicativa del procedimiento de compresión.

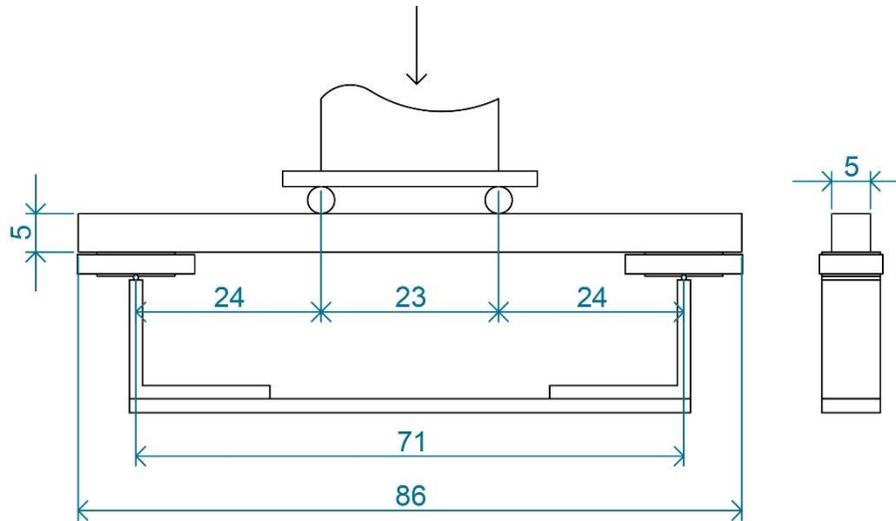


Ilustración 24: Disposición del equipo con soportes articulados

Cabe señalar que incluso con los soportes articulados, las pruebas siguieron presentando deslizamientos, por lo que se eliminaron un total de 6 probetas. Sólo un total de cuatro pruebas se registran para el cálculo de los esfuerzos resistentes.

	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación
Esfuerzo máximo a las fibras externas ($\epsilon=0.025$), (kg/cm ²)	151.36	128.04	105.35	138.48	130.81	16.86	12.89
Esfuerzo a ruptura (kg/cm ²)	No ocurrió	No ocurrió	No ocurrió	No ocurrió			
Módulo de elasticidad (kg/cm ²)	7,561.56	9,560.52	11248.24	7813.01	9045.83	1486.47	16.43
Modulo secante (kg/cm ²)	79830.45	97786.16	87980.59	82650.78	87062.00	6848.46	7.87

Tabla 11: Resultados de la prueba de flexión

La variación de resultados que se obtienen con los ensayos es bastante pronunciada. Por ejemplo para el módulo de elasticidad se produce una variación de 16.43%, por lo que se confirma que la suma de las irregularidades del material y los deslizamientos (siguieron ocurriendo pero a diferente intensidad) son factores que intervienen en la resistencia del material que registra la máquina.

El valor con mayor consistencia en las pruebas fue el módulo secante, seguido del esfuerzo máximo en las fibras externas. Aunque no se alcanza un valor confiable en el coeficiente de variación se puede utilizar para efectos de la investigación, mediante el argumento de que a mayor número de probetas ensayadas, el coeficiente disminuirá hasta un valor confiable.

La deformación que presentan todas las probetas es amplia y en ninguna sucede la ruptura, por lo que es imposible definir el punto de ruptura del material con la sección ensayada. La viga desarrolla una deflexión sin ruptura de 5.5 cm; no es posible producir una mayor deflexión porque el accesorio que se utiliza para la prueba no lo permite a causa de un par de tornillos que sujetan el punto de carga.

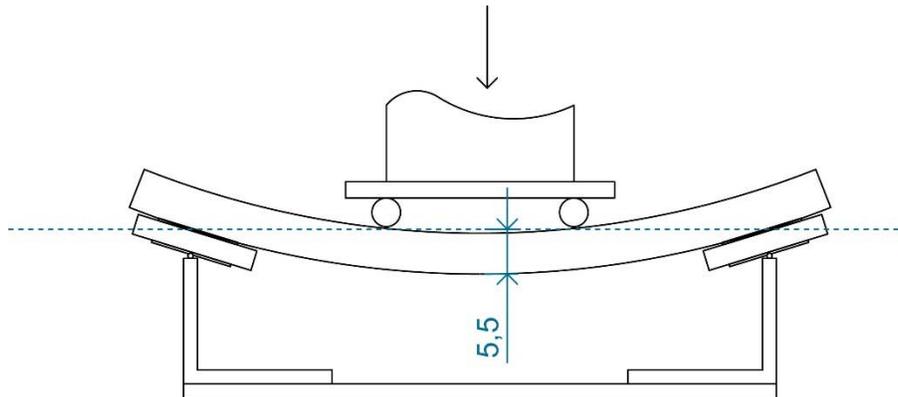


Ilustración 25: Deflexión de la viga con soportes articulados

En la ilustración, que abajo se muestra, se observa que la deflexión máxima que se puede producir en la máquina no fue capaz de generar ruptura en la probeta, incluso con la pronunciada deflexión que se puede corroborar en la imagen. También es posible observar el par de tornillos que se ubican a los costados de cada punto de carga, los cuales no permiten producir mayor deflexión porque hacen contacto con la pieza que se ensaya.

En la misma ilustración se observa una aparente firmeza en los apoyos, sin embargo en la realidad dichos apoyos permiten pequeños deslizamientos que pueden ser registrados por la máquina con mucha facilidad.

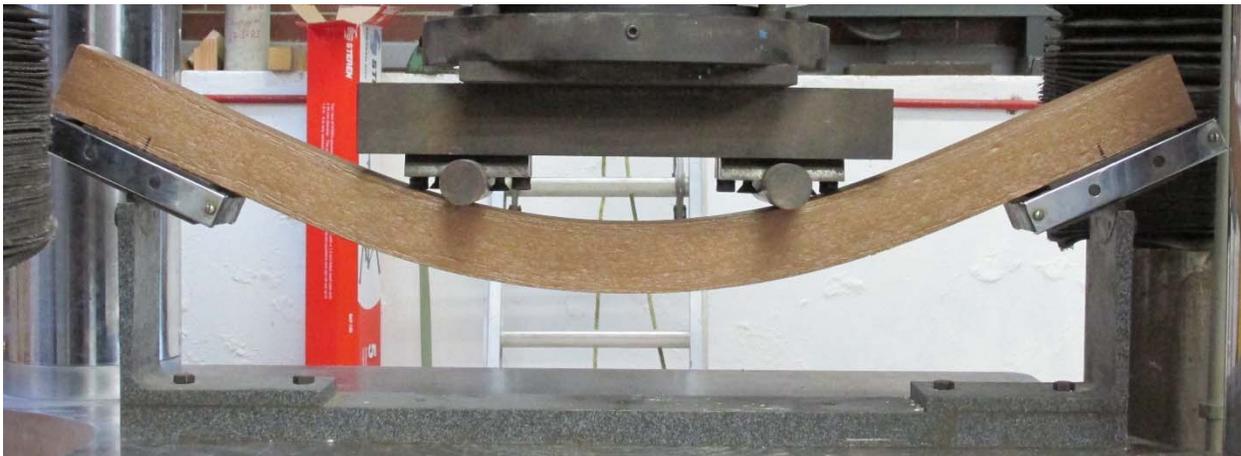
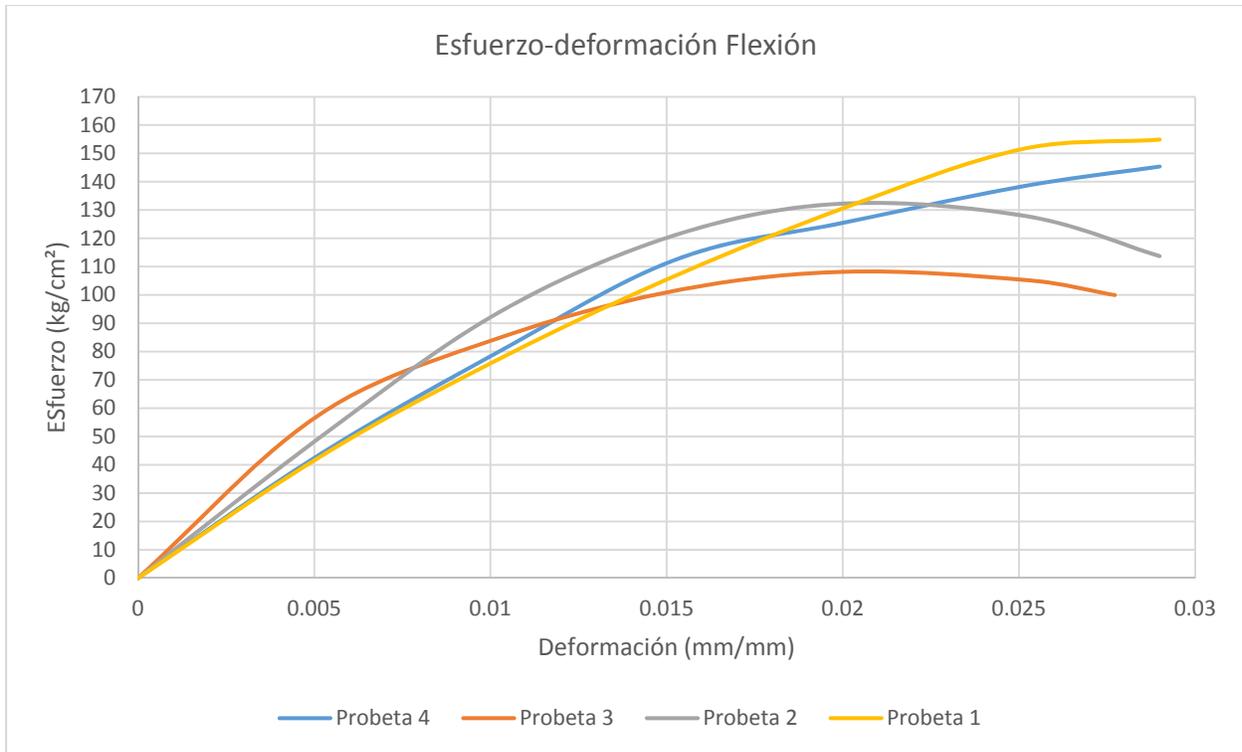


Ilustración 26: Probeta flexionada al máximo permitido por el equipo.



Gráfica 8: Gráfica esfuerzo-deformación flexión

La grafica de esfuerzo-deformación demuestra la variación que se registra en los ensayos. Las probetas 1 y 4 mantienen una similitud cercana, la probeta 3 es el ensayo que más se aleja del resto con una curva que primero indica un módulo de elasticidad mayor para después producir un esfuerzo máximo de 105.35 kg/cm² que la ubica como la probeta con la menor resistencia.

Las probetas se dejaron reposando a temperatura ambiente interior durante 20 días, sin embargo la deformación que alcanzaron todas las probetas produjo una deformación permanente de 12 mm aproximadamente, lo cual indica que las probetas rebasaron el límite viscoelástico antes de llegar al esfuerzo máximo.

3.4.3 Conclusiones

A pesar de que hubo una variación notable entre los ensayos, las probetas se comportaron como se esperaba, es decir, con una deformación plástica pronunciada y una deformación elástica corta. Los resultados demostraron que la deformación elástica bajo los esfuerzos a flexión es diferente a los esfuerzos axiales, presentando mayor rigidez, aproximadamente un 35% más, por lo tanto es un material viable para resistir esfuerzos a flexión.

La información encontrada en el presente ensayo no es definitiva en los valores de esfuerzo último y esfuerzo máximo a causa de que la deformación que recibió el material no es suficiente para provocar la fractura de la pieza. Con la intención de conocer los esfuerzos mencionados se propone someter, al mismo esfuerzo, probetas con una sección, mínimo, de dos veces la profundidad que el ancho y un largo de 120 cm. Al someter una probeta con una sección de esas características se obliga al material a responder bajo una deformación mayor, lo cual pueda producir la fractura esperada. El largo propuesto es para evitar deslizamientos de la probeta sobre los soportes.

Los datos encontrados se utilizan para el desarrollo del cálculo estructural de la presente investigación aunque no son los resultados definitivos, pero se confía que la variación que pueda existir sea pequeña, debido a la información encontrada de los esfuerzos resistentes de materiales similares.

3.5 Prueba del coeficiente de expansión térmica lineal

3.5.1 Procedimiento

Las pruebas se realizan en el laboratorio de Cristalofísica y materiales naturales del Instituto de Física de la UNAM bajo la supervisión del Dr. Eligio Orozco Mendoza, encargado del laboratorio, y el Mtro. Alberto Muciño, asesor en la presente investigación.

Para la determinación del Coeficiente de expansión térmica lineal se utiliza como base la norma ASTM D6341-98, sin embargo se decide modificarla con la intención de aumentar la precisión de las mediciones. En dicha norma el procedimiento consiste en someter el material a las temperaturas predefinidas y enseguida tomar la medida de la probeta con un calibrador para registrar los cambios de dimensión, sin embargo, por recomendación del personal del laboratorio, se decide realizarlas mediante un método y equipo distintos.

Se divide el equipo necesario para realizar la prueba en dos partes: prueba a una temperatura alta y prueba a la temperatura baja.

El equipo para la prueba a temperatura baja es el siguiente:

- Charola de acero inoxidable de 50cm x 50cm x 15cm
- Charola de aluminio flexible de 30cm x 45cm x 10cm
- Anticongelante con la capacidad de resistir una temperatura de menor a -30°C
- Nitrógeno líquido
- Pinzas con el tamaño necesario para manipular la probeta
- Termómetro de mercurio con la capacidad de registrar temperaturas hasta -30°C
- Calibrador de 30cm con una precisión de 0.02mm;

Para la prueba a temperatura alta se utiliza:

- Caja de acrílico transparente que al interior se colocan un total de 6 focos incandescentes de 60w cada uno
- Potenciómetro graduado conectado a los 6 focos que controla la intensidad del voltaje
- LVDT (sensor de movimiento)
- Base de aluminio para LVDT y muestra que se desea ensayar
- Multímetro con capacidad para medir temperatura
- 2 termopares (uno conectado al multímetro y otro a la computadora)
- Computadora que recibe los registros y los administra por medio del software LabView

Se fabrican las probetas a partir de perfiles cuadrados de madera plástica color café con una sección de 5cm x 5cm y largo promedio de 29.3cm. En total se cortaron 5 probetas, de acuerdo a la norma ASTM. Se debe medir cada probeta a temperatura ambiente antes de comenzar la prueba, así como marcar con tinta indeleble una línea horizontal a lo largo de la probeta.

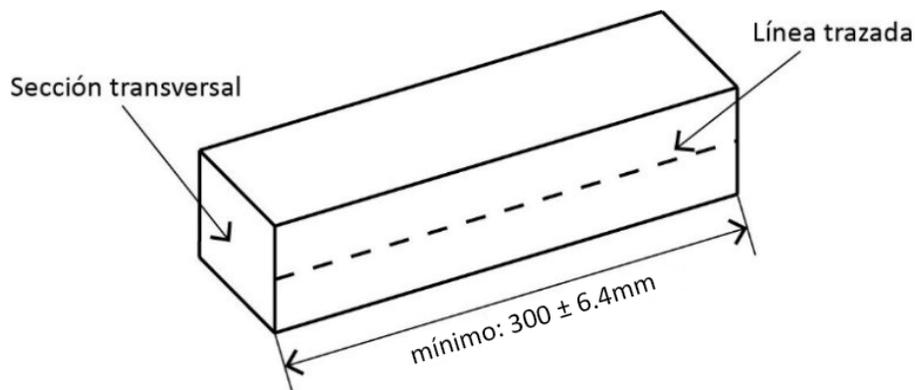


Ilustración 27: Línea de referencia para mediciones

La charola de aluminio se coloca al interior de la charola de acero, después se vierte el anticongelante en la charola de aluminio y por último el nitrógeno líquido al interior de la charola de acero. El nitrógeno líquido debe colocarse en la charola poco a poco para controlar la temperatura del anticongelante; esto se realiza con precaución y midiendo continuamente la temperatura con el termómetro de mercurio hasta que el anticongelante alcance -30°C .



Ilustración 28: Enfriamiento del anticongelante

Cuando el anticongelante tiene una temperatura de -30°C , se sumerge la probeta para someterla a la condición. Es necesario girar la probeta para que todo el material mantenga la temperatura del anticongelante durante 15 minutos; durante ese tiempo se debe cuidar que el anticongelante mantenga los -30°C . Pasados los 15 minutos se procede a retirar la probeta del anticongelante y medir el largo por medio del calibrador. Se registra la dimensión.

Inmediatamente después, la probeta se coloca en la base de aluminio ubicada al interior de la caja de acrílico, enseguida se calibra el LVDT y se verifica que la temperatura registrada por ambos termopares sea similar. El siguiente paso es encender el potenciómetro (se calibra a $60\%=60^{\circ}\text{C}$) hasta un total de 60% de su capacidad y se da inicio, por medio del LabView, al registro de los datos.

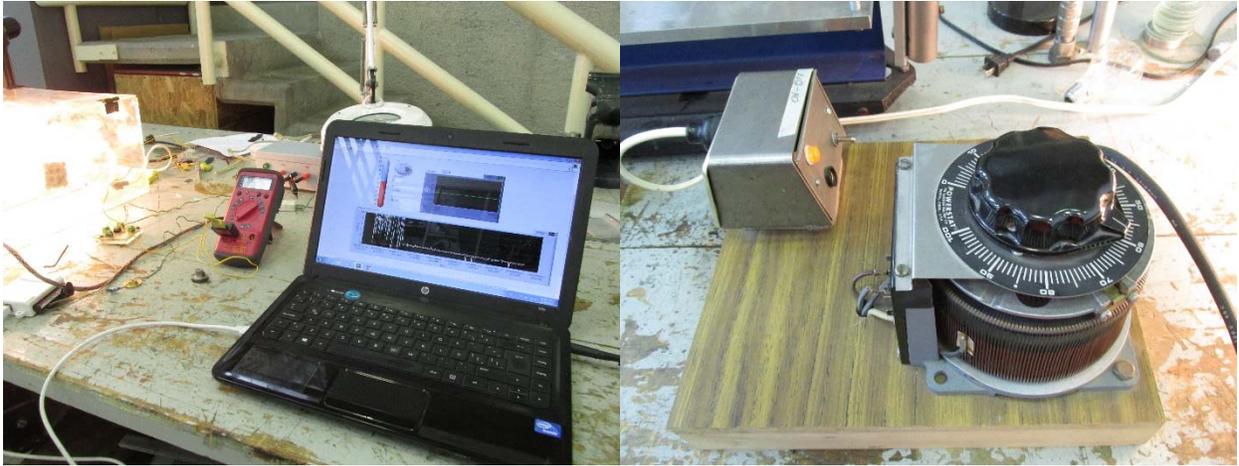


Ilustración 29: Equipo para la prueba a alta temperatura

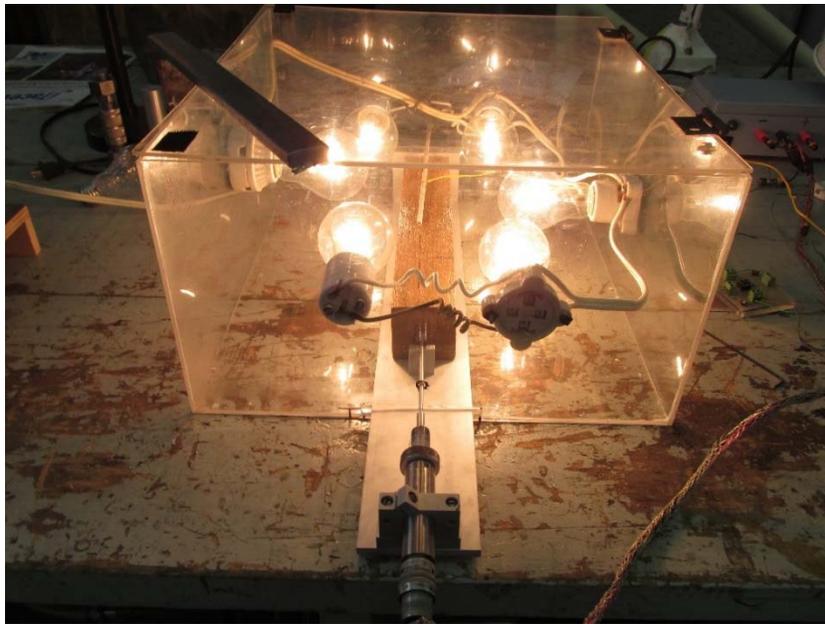


Ilustración 30: Caja de acrílico con focos en funcionamiento

Se extraen los datos registrados durante la prueba y se procede al procesamiento de los mismos. Primero se obtiene la pendiente del mejor ajuste lineal de los datos encontrados con la siguiente expresión:

$$m = \frac{3(\sum L_i T_i) - (\sum L_i)(\sum T_i)}{3(\sum T_i^2) - (\sum T_i)^2}$$

Ecuación 9

Donde:

m= pendiente

L_i = largo de cada una de las probetas

T_i = temperatura de cada una de las observaciones

A continuación se calcula el coeficiente de expansión térmica lineal para cada una de las probetas ensayadas mediante la inversa del cuadrado del largo de la probeta multiplicado por la pendiente de la regresión lineal, es decir:

$$\alpha = \frac{1}{L_2} m$$

Ecuación 10

Donde:

α = Coeficiente de expansión térmica lineal a 21°C

L_2 = Largo de la probeta a la temperatura de referencia (21°C)

m= pendiente

Procesados los datos de cada una de las pruebas se calcula el promedio, la desviación estándar por medio de la ecuación 3 y el coeficiente de variación. El resultado promedio se considera como el valor que se debe utilizar para el cálculo de expansión térmica del material mediante la siguiente expresión:

$$\Delta L = L_0(\alpha\Delta T)$$

Ecuación 11

Donde:

ΔL = diferencial de longitud

L_0 = largo de la probeta a la temperatura de referencia (21°C)

α = coeficiente de expansión térmica lineal a 21°C

ΔT = diferencial de temperatura

3.5.2 Resultados

Los ensayos se realizaron con éxito y delimitados por el procedimiento mencionado teniendo como resultado el Coeficiente de expansión térmica lineal que se utiliza en el cálculo del sistema estructural teórico para la madera plástica estudiada.

Probeta 1

	Temp. Registrada (°C)	Desplazamiento (mm)	Dimensión final (mm)
Temperatura bajo cero	-30		291.18
Temperatura de referencia	21.1606	0.6737	291.85
Temperatura alta	60.1435	1.4295	293.28

Probeta 2

	Temp. Registrada (°C)	Desplazamiento (mm)	Dimensión final (mm)
Temperatura bajo cero	-30		291.94
Temperatura de referencia	21.7903	0.6042	292.54
Temperatura alta	60.1435	1.3875	293.93

Probeta 3

	Temp. Registrada (°C)	Desplazamiento (mm)	Dimensión final (mm)
Temperatura bajo cero	-30		291.92
Temperatura de referencia	21.7903	0.6388	292.56
Temperatura alta	60.1435	1.6328	294.19

Probeta 4

	Temp. Registrada (°C)	Desplazamiento (mm)	Dimensión final (mm)
Temperatura bajo cero	-30		290.82
Temperatura de referencia	21.7903	0.4362	291.26
Temperatura alta	60.1435	1.6606	292.92

Probeta 5

	Temp. Registrada (°C)	Desplazamiento (mm)	Dimensión final (mm)
Temperatura bajo cero	-30		292.02
Temperatura de referencia	21.1606	0.6126	292.63
Temperatura alta	60.1435	1.5624	294.20

Tabla 12: Resultados por probeta

	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Promedio	Desviación estándar	Variación %
α	7.82E-05	7.35E-05	8.36E-05	7.70E-05	8.03E-05	7.85E-05	3.38E-06	4.31

Tabla 13: Coeficiente de expansión térmica lineal resultante

Se tuvo mucho cuidado en las mediciones para que las variaciones que se obtuvieran fueran registradas con precisión, además las temperaturas que se registraron de referencia se realizaron mediante los registros hechos por el LVDT y una temperatura controlada, sin embargo la temperatura que se toma de referencia estuvo alrededor de los 21°C, sin alcanzar la precisión en decimales en todas las pruebas. A pesar de ello la variación más pequeña en dimensiones se da en la probeta 2 y la más pronunciada se da en la probeta 3, con un coeficiente de variación del 4.31%.

3.5.3 Conclusiones

El coeficiente de expansión obtenido mediante este procedimiento da la seguridad de las mediciones que se realizan a altas temperaturas, sin embargo genera una pequeña incertidumbre con las mediciones que se hacen a bajas temperaturas por la utilización del calibrador y el termómetro de mercurio. Si se compara el presente procedimiento con el que la norma del ASTM propone, se tiene como conclusión que la determinación del coeficiente es más preciso a causa del el equipo que se utiliza debido al uso de equipo digital. Por lo tanto, si se considera el coeficiente de variación y el procedimiento que se utilizó, es posible deducir que el coeficiente de expansión térmica obtenido (7.85E-05) es altamente confiable.

3.6 Prueba de gravedad específica (peso volumétrico)

3.6.1 Procedimiento

La prueba se realiza con base en la norma ASTM D6111-03 que trata de la determinación de la gravedad específica y peso volumétrico de la madera plástica. Para ello se utiliza el siguiente material:

- Báscula de gancho Electron Fishhook con una precisión de ± 20 grs
- Termómetro digital con sensor de termopar y pantalla LCD. Precisión 0.1 °C
- Contenedor de agua de PEAD con capacidad de $32\ 000\text{ cm}^3$ (40 cm x 20 cm x 40 cm)
- Plomo de material desconocido y un peso de $1\ 450$ kg
- Cordón
- 5 probetas de madera plástica de color blanco con una medida aproximada de 10cm x 10cm x 20cm.

Primero se marca con un número cada probeta para identificarlas. Se procede a calentar agua hasta que alcance una temperatura 23 ± 2 °C y se vacía en el recipiente. Después se pesan cada una de las probetas en el aire y se registra. También se pesa el plomo en el agua y se registra. A continuación se sujeta la probeta al plomo y se cuelga en la báscula para después sumergir la probeta en el agua hasta que quede totalmente cubierta. Se registra el peso marcado en la báscula. Se repite el procedimiento para cada una de las probetas.

Una vez realizados los ensayos se procede a promediar cada uno de los grupos pesados para después aplicar las siguientes ecuaciones:

$$Sp\ gr\ 23/23\text{ }^{\circ}\text{C} = \frac{a}{(a + w - b)}$$

Ecuación 12

Donde:

a= peso de la probeta en el aire

b= peso de la probeta sumergida en el agua con el plomo

w= peso del plomo sumergido en el agua

$$D, g/cm^3 = Sp\ gr\ 23/23\text{ }^{\circ}\text{C} * 0.9976$$

Ecuación 13

La ecuación 12 se utiliza para generar el peso específico del material, en cambio la ecuación 13 produce el peso volumétrico. Ambos resultados se registran.

3.6.2 Resultados

Se realizan los ensayos como establece el procedimiento y se obtienen los promedios. Los resultados de la prueba se resumen en la tabla 14.

	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Promedio
Aire ,a	1470	1420	1410	1390	1430	1424
Agua, b	600	600	610	630	490	586
Plomo, w	1120	1120	1120	1120	1120	1120

Tabla 14: Resultados de la prueba

Los valores promedio son los que se consideran para realizar el cálculo de la gravedad específica y el peso volumétrico, sustituyendo los valores de la siguiente manera:

$$Sp_{gr 23/23\text{ }^{\circ}C} = \frac{1424}{(1424 + 1120 - 586)} = 0.727$$

Y para obtener el peso volumétrico:

$$D, g/cm^3 = 0.727 * 0.9976 = 0.726 g/cm^3$$

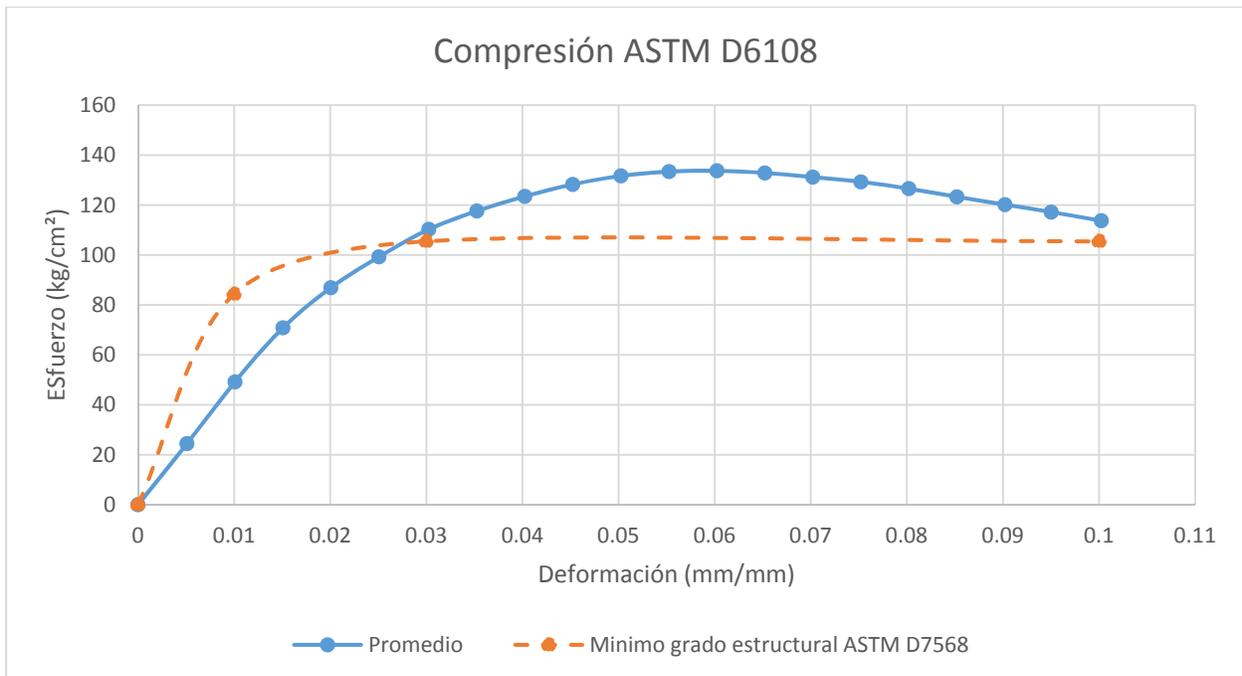
3.6.3 Conclusiones

Los resultados que se observan indican que el material tiene un peso similar a unos tipos de madera, sin embargo, según (Parker, 1992, pág. 23) indica que el peso que se utiliza para realizar los cálculos en madera natural es de 643 kg/cm³, por lo tanto el material estudiado es aproximadamente 80 kg más pesado.

Se concluye que la MPPR es un material que no puede competir en peso con la madera natural, sin embargo la diferencia es pequeña, por lo que se puede considerar dependiendo de la aplicación que se le asigne. Es necesario comparar el material con más características para definir cuál material puede ser utilizado en qué aplicaciones.

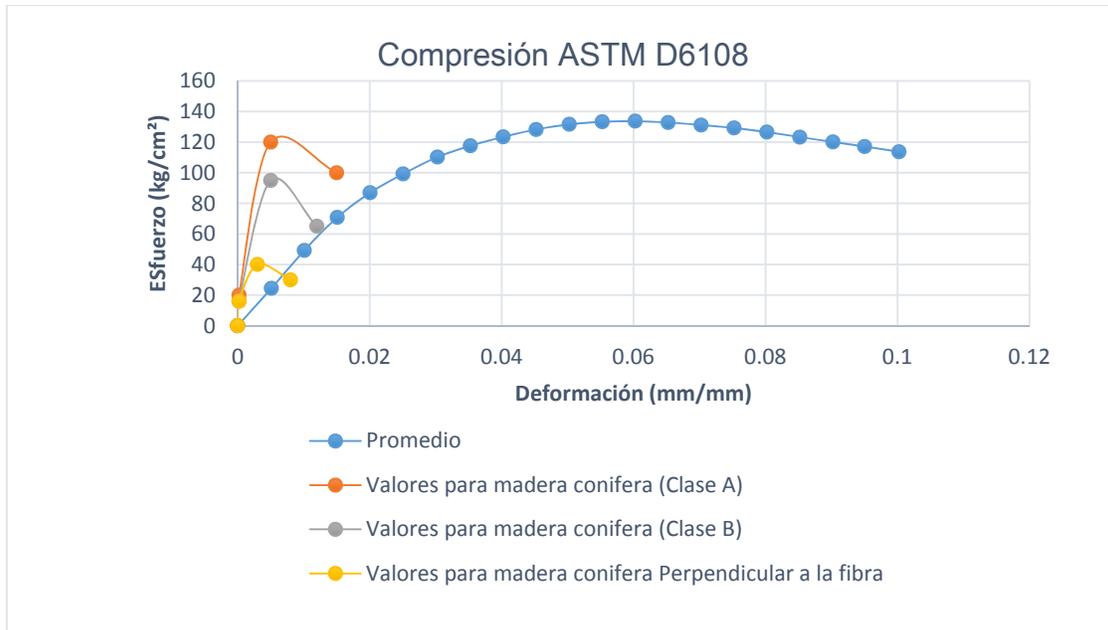
3.7 Comportamiento del material con base a sus propiedades mecánicas

Queda demostrado, por medio de las pruebas que se realizaron, que el comportamiento del material es predominantemente plástico, donde la división entre la zona viscoelástica y viscoplástica del material se define difícilmente a un esfuerzo preciso, sin embargo se toma la propuesta de las normas ASTM sobre tomar el esfuerzo al 0.03 mm/mm de deformación, en todos los tipos de esfuerzos, para determinar dicha división.



Gráfica 9: Esfuerzo deformación compresión y grado estructural

La gráfica 9 compara la curva esfuerzo-deformación promedio de la madera plástica estudiada bajo esfuerzos de compresión y la curva generada a partir de los límites que propone la norma ASTM D7568 para considerarse como madera plástica de grado estructural. Se observa que la rigidez que propone la norma es mayor a la rigidez que posee el plástico que se estudia, por lo tanto el módulo de elasticidad no es suficiente para cubrir lo requerido, sin embargo el esfuerzo máximo y el esfuerzo al 3% de deformación es superado.

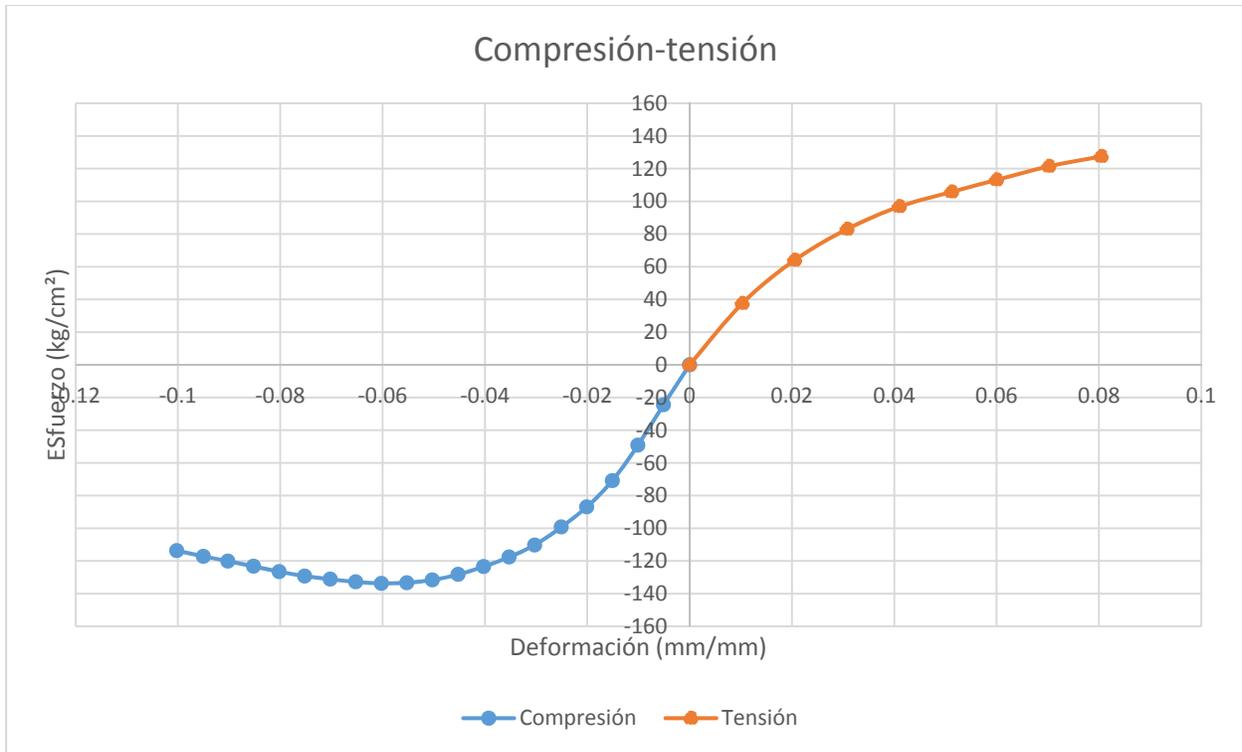


Gráfica 10: Comparativa con la madera natural

La norma no aplica a nivel estructural en materiales que no lo alcance, por lo que se debe tener cuidado con la resistencia que se prueba del material para producir un sistema que resista las condiciones que éste le exija.

Ahora bien, haciendo la comparativa entre la madera plástica y la madera natural (gráfica 10) se tiene que la rigidez de la madera natural es mucho mayor, pero la capacidad de deformación de la madera plástica es superior, de aquí se deduce que la madera plástica es un material más dúctil que la madera natural, es decir que puede resistir mayor esfuerzo sin fracturarse y fallar con más lentitud que la madera natural. Además, el esfuerzo máximo que presenta la madera plástica es superior al esfuerzo máximo que se considera para la madera natural.

En resumen, la comparación de la madera natural con la madera plástica indica que son materiales completamente distintos. La madera plástica estudiada no se debe considerar como madera natural y por ningún motivo deben utilizarse para los mismos propósitos. Se debe tener muy claro que trabajan totalmente distintos bajo el mismo esfuerzo, por lo que es necesario prever esas diferencias al momento de diseñar algún elemento estructural para evitar fallas en el sistema.

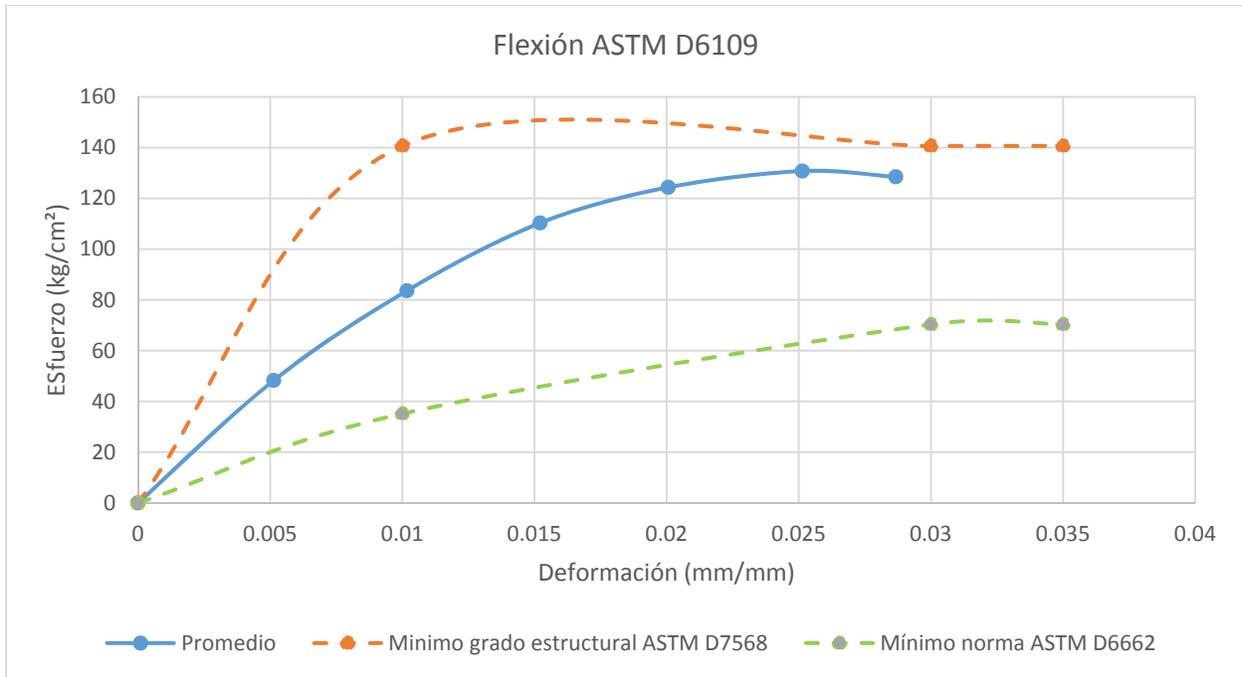


Gráfica 11: Esfuerzo-deformación axial

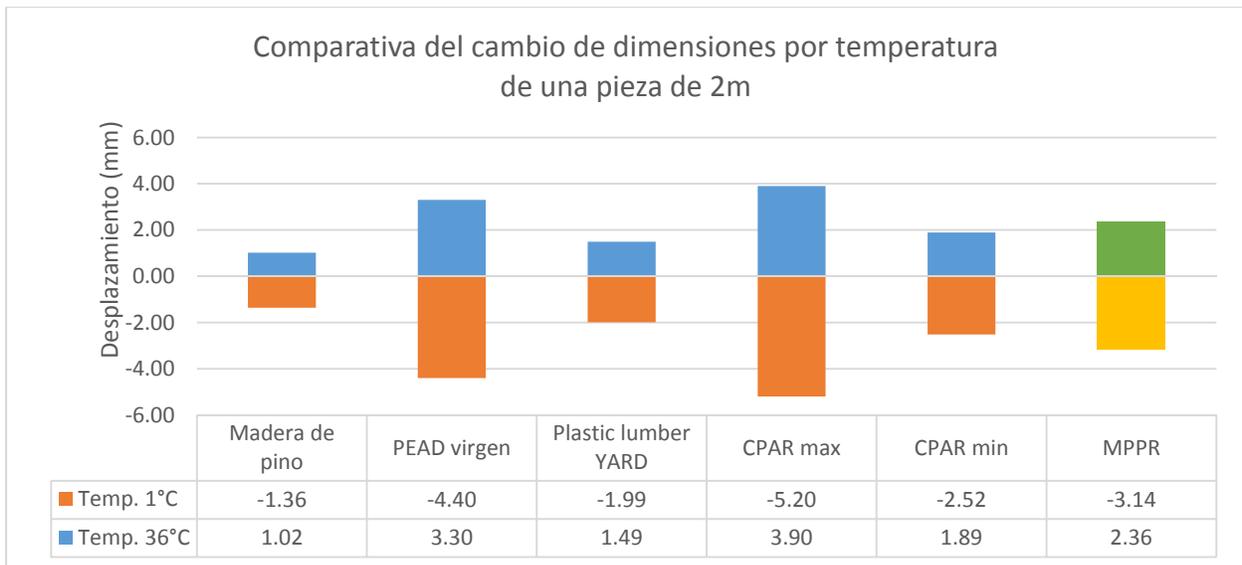
En la gráfica anterior se colocan la curva de esfuerzo-deformación a esfuerzos de compresión y tensión para verificar la continuidad de deformación que presenta el material bajo esfuerzos axiales; con ello se puede establecer que ambas pruebas se realizaron de manera adecuada. Tanto la deformación como el esfuerzo que presentan es similar, por lo tanto el material tiene una resistencia máxima parecida, pero se comporta mejor bajo esfuerzos a compresión.

Se analizan la curva esfuerzo-deformación de flexión promedio y los límites de comportamiento para dos diferentes usos de la madera plástica (estructural y de bajas exigencias). Se encuentra que la madera plástica estudiada esta entre los dos límites, justo en el centro de los límites de rigidez y muy cercano del límite del esfuerzo máximo del nivel estructural.

A partir de lo anterior se deduce que el material que se estudia tiene un comportamiento que supera lo aceptable bajo esfuerzos a flexión, ya que supera por una cantidad de 60 kg/cm² el esfuerzo mínimo que se necesita para utilizarse en elementos de bajas exigencias, pero se encuentra por debajo del nivel estructural por 10 kg/cm², por lo tanto es un material, que a pesar de ser elaborado con el 100% de PEAD reciclado y sin ningún tipo de refuerzo, capaz de resistir esfuerzos muy cercanos al nivel estructural pero con deformaciones más pronunciadas, que se encuentra abajo con una diferencia alrededor de los 60 kg/cm² en el 0.01 mm/mm de deformación unitaria.



Gráfica 12: Comparativa mínimos por las normas y promedio flexión



Gráfica 13: Variación de dimensiones por temperatura de varios materiales

La prueba de expansión térmica lineal se realiza para tener el conocimiento del comportamiento dimensional del material a temperaturas extremas y se observa que tiene un coeficiente de expansión térmica que se ubica un poco por encima de la marca de madera plástica que sufre menor diferencia dimensional.

La gráfica 8 recolecta la información de un ejercicio que se realiza para conocer el cambio dimensional en una pieza de 2m de longitud de varios materiales, entre ellos una pieza de madera de pino y el resto de madera plástica incluyendo la estudiada en esta investigación; calculado con

las temperaturas máximas y mínimas registradas en la Ciudad de México. Se observa que la madera plástica estudiada se expande a una temperatura de 36°C un total de 0.84 mm más que la marca de madera plástica que presenta menor cambio y, con respecto a la madera de pino, existe una diferencia de 1.34mm más. Con estos datos, para una pieza de 2m, que sea parte de una construcción en la Ciudad de México, se recomienda que sea diseñada por expansión térmica con un juego de 6mm por unión para garantizar la seguridad en la construcción. Por lo tanto resulta una distancia aceptable para la adaptación en una construcción

Propiedades mecánicas de la MPPR de la empresa mexicana

Compresión		
Módulo elástico (kg/cm ²)	Esfuerzo al 3% de deformación (kg/cm ²)	Esfuerzo máximo (kg/cm ²)
4836.26	109.78	132.13
Tensión		
Módulo elástico (kg/cm ²)	Esfuerzo al 3% de deformación (kg/cm ²)	Esfuerzo máximo (kg/cm ²)
3966.82	82.96	138.13
Flexión		
Módulo elástico (kg/cm ²)	Esfuerzo al 3% de deformación (kg/cm ²)	Esfuerzo máximo (kg/cm ²)
9045.83	130.81	No encontrado
Coeficiente de expansión térmica lineal		
7.85E-05		
Peso volumétrico		
0.726		

Tabla 15: Propiedades mecánicas de la MPPR de la empresa mexicana

En conclusión, el material se debe utilizar, predominantemente, en esfuerzos a compresión por dos principales razones: el material resiste mejor (132.13 kg/cm²) y la deformación puede ser aceptada si se diseña un elemento estructural que no le afecte el cambio, es decir no presente falla por el movimiento del mismo. Se debe utilizar el coeficiente de expansión térmica lineal para calcular el cambio de dimensiones de la pieza para diseñar el sistema estructural de acuerdo a las holguras que requiera.

4. Aplicación teórica de la MPPR de la empresa mexicana en un sistema arquitectónico-estructural

4.1 Proyecto teórico de aplicación

Como se puede corroborar en el capítulo de las aplicaciones de la madera plástica, se ha omitido el uso del material en elementos arquitectónicos estructurales, sólo se ha utilizado para objetos ingenieriles como puentes, por tal motivo se propone en esta investigación utilizar, a partir de los datos encontrados en las pruebas mecánicas, la madera plástica de la empresa mexicana, en un objeto arquitectónico estructural que no requiera esfuerzos mayores a los que resiste el material, tal es el caso de cubiertas.

Las ventajas de utilizar la madera plástica en cubiertas son: el nulo mantenimiento y la ligereza en comparación con la madera natural. La dificultad de mantenimiento, por ser una cubierta, hace que la madera plástica aventaje a la madera natural.

Con base en las propiedades mecánicas y térmicas encontradas, se concluye que un sistema estructural que trabaje a compresión y no exija altas resistencias es el indicado para la madera plástica estudiada, por lo tanto las cubiertas basadas en la función funicular es una opción viable.

$$y = c \cosh(x/c)$$

Ecuación 14

donde:

y= distancia de la ordenada

c= distancia del origen al inicio de la flecha

x= distancia de la abscisa

cosh= coseno hiperbólico

La ecuación anterior define la geometría ideal para generar un arco que permita al material trabajar predominantemente con esfuerzos de compresión. (Torroja Miret, 2007) menciona, en el capítulo dedicado a los arcos como elementos estructurales, que la relación 1/7 entre el flecha y el claro del arco generan una geometría capaz de garantizar esfuerzos a compresión en todos los elementos que lo conforman. Se utiliza dicha relación y la función funicular para conseguir el trazo de los arcos.

Se propone cubrir un claro hipotético de 12m de ancho por 20m de longitud para comprobar la estabilidad de la estructura con la madera plástica.

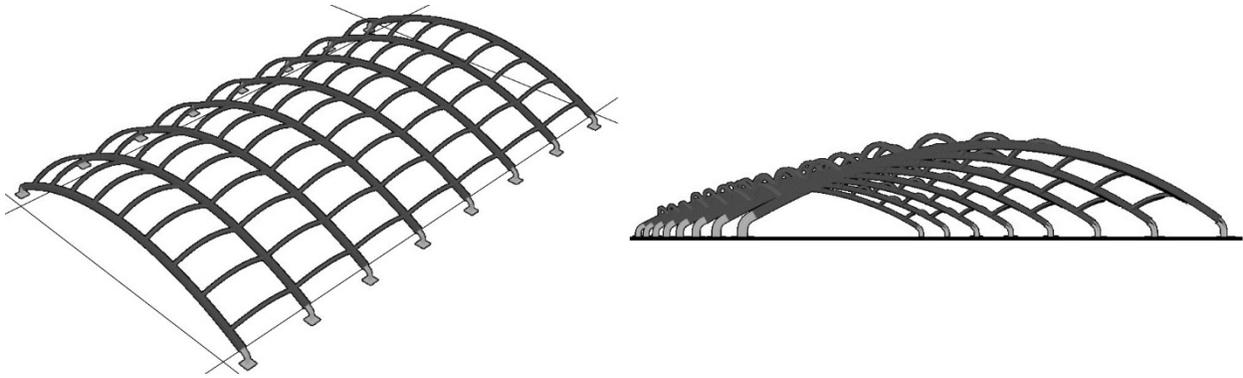


Ilustración 31: Perspectivas

4.1.1 Geometría

Para trazar el arco funicular se busca c (distancia del origen al punto alto de la flecha) con respecto a f (flecha). El valor c se obtiene por medio de la diferencia de la coordenada y máxima y c ; una vez encontrada la flecha deseada se anota el valor c correspondiente y se aplica a la función funicular en conjunto con los valores de x para definir el claro.

Las flechas se calculan de la siguiente manera:

$$1/7 (13) = 1.85 \sim 1.8$$

Y

$$1/7 (2.8) = 0.4$$

donde:

1/7 es la relación flecha y claro,

13 es el claro largo y

2.8 es el claro corto

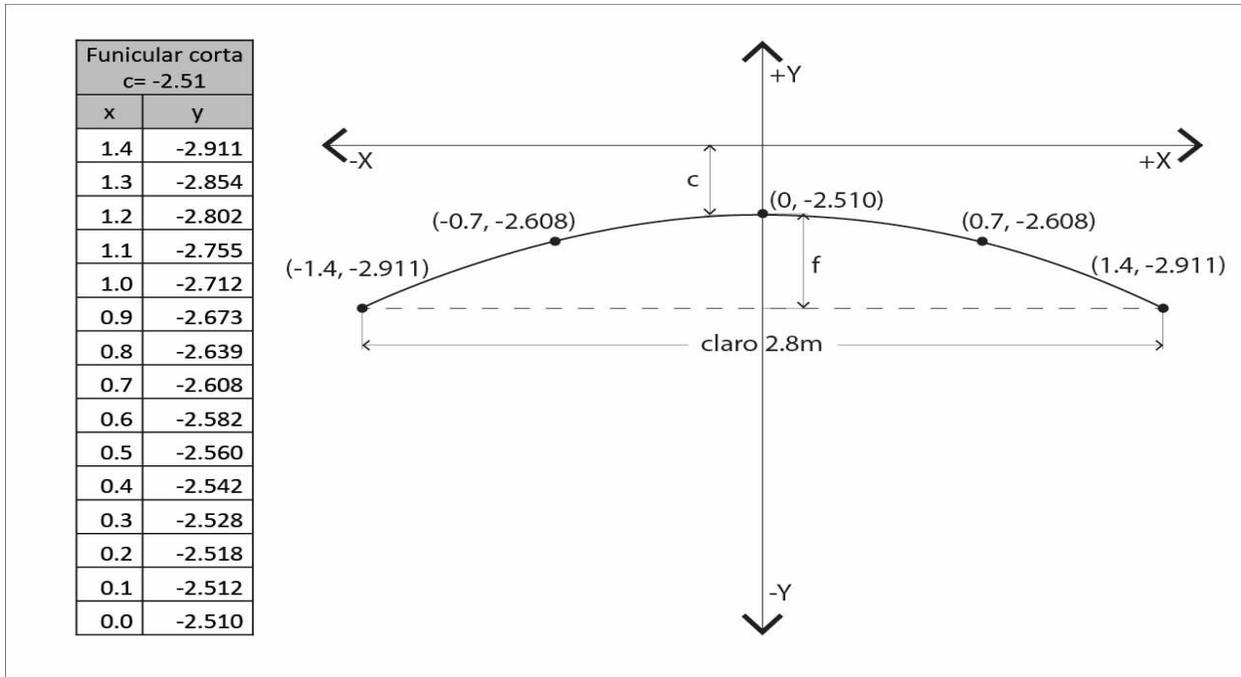


Ilustración 32: Trazo del arco funicular con claro de 2.8m

La ilustración anterior muestra el trazo del arco para el claro de 2.8m, el cual se observa que el valor c , que se obtuvo para una flecha de 0.4m, es -2.510 y la ilustración siguiente corresponde al trazo del arco con el claro de 13m, donde se obtiene $c=-14.320$.

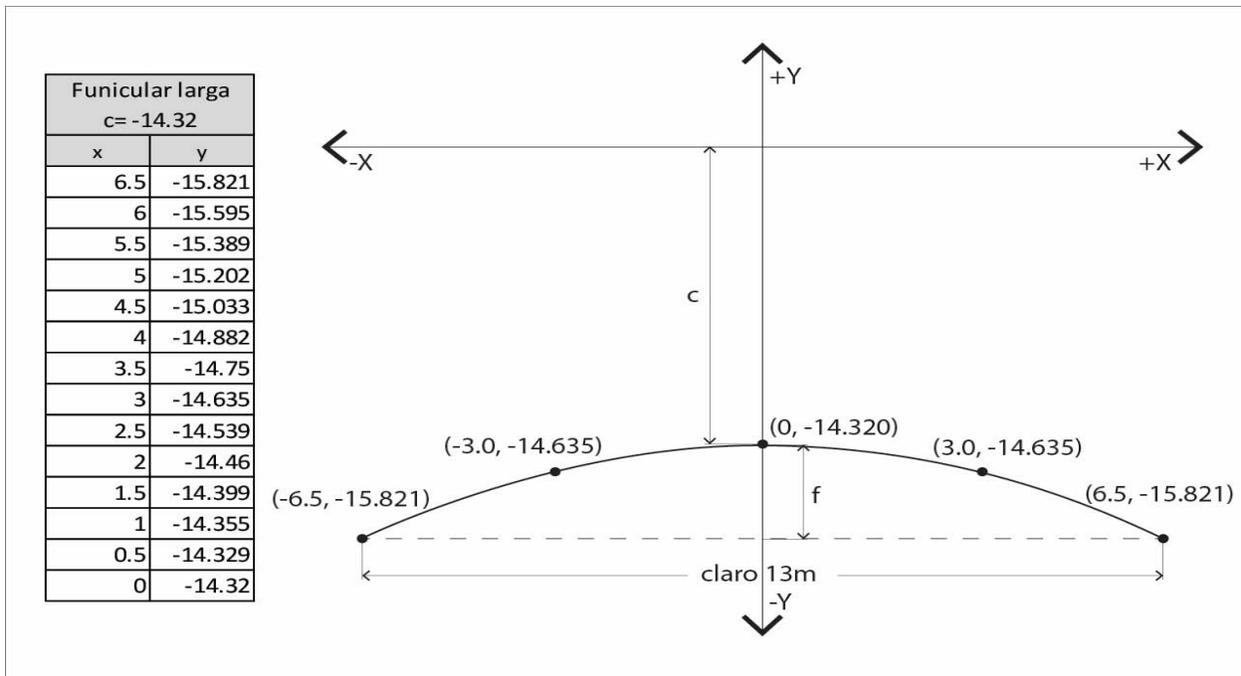


Ilustración 33: Trazo del arco funicular con claro de 13m

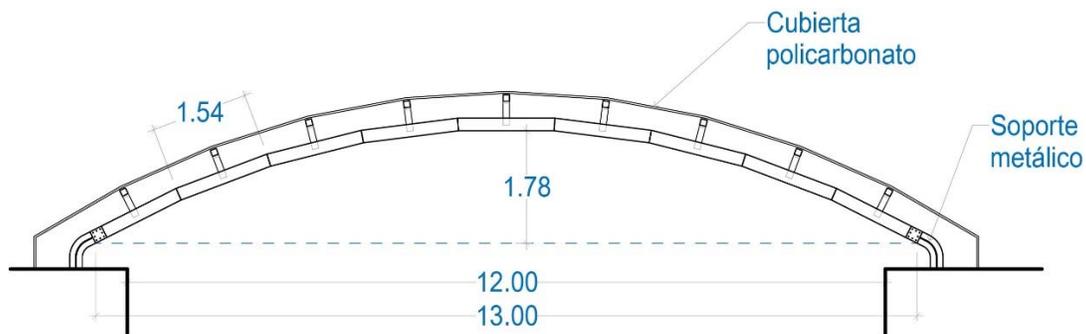
Después de establecer la geometría base de los arcos, tanto principales como secundarios, se trazan las piezas con los cortes que se requieren para mantener dicha geometría y se definen las dimensiones generales de la cubierta.

4.1.2 Propuesta de conexiones y bases

El objetivo del sistema estructural es evitar que el material trabaje en exceso bajo esfuerzos a tensión o flexión, por lo tanto las uniones y las bases que se proponen deben limitarse al objetivo.

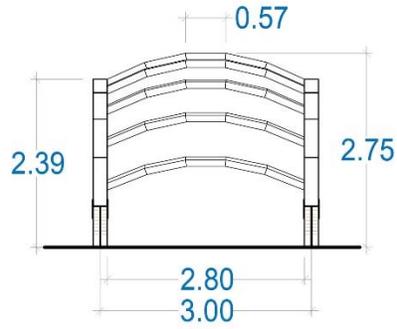
Las uniones que se proponen deben ser similares a las utilizadas para la madera natural, es decir por medio de placas metálicas. Las piezas que componen los arcos se proyectan con un corte al centro de la pieza que permita introducir una placa metálica barrenada para pasar un par de tornillos que sujetan la placa a la pieza y, a su vez, la pieza que se ensambla con ella.

Es bien entendido que si no se sigue el tazo del arco funicular, no es posible enfocar los esfuerzos a compresión, por lo tanto en las bases se decide proyectar un elemento metálico que permita la unión de la superficie con la madera plástica, para que absorba los esfuerzos flexionantes que produzca el sistema en esa zona y de esta manera eliminar cualquier esfuerzo excesivo a flexión sobre el material estudiado. Las siguientes ilustraciones muestran los planos de la cubierta proyectada.



VISTA FRONTAL

Ilustración 34: Vista frontal de la cubierta propuesta



VISTA LATERAL

Ilustración 35: Vista lateral de la cubierta propuesta

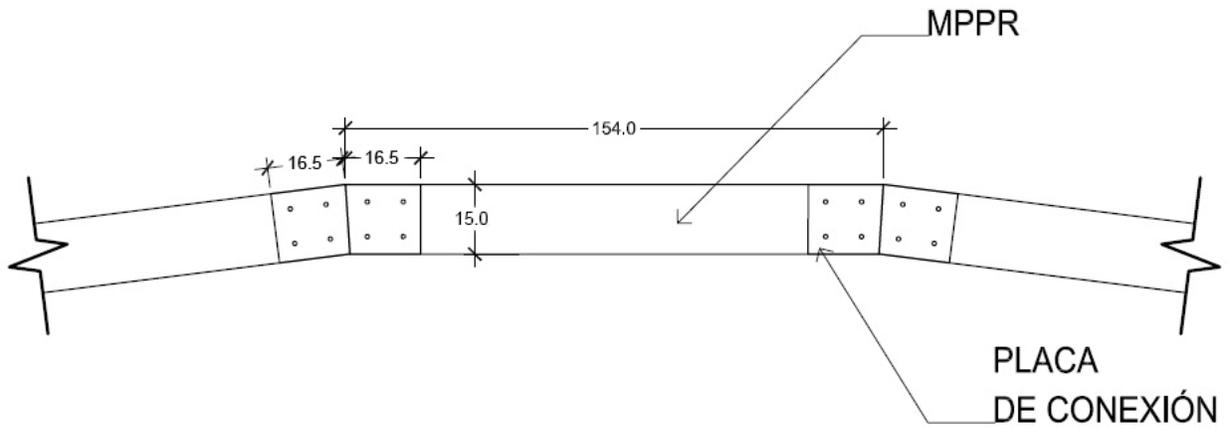


Ilustración 36: Detalle de conexiones. Vista Frontal.

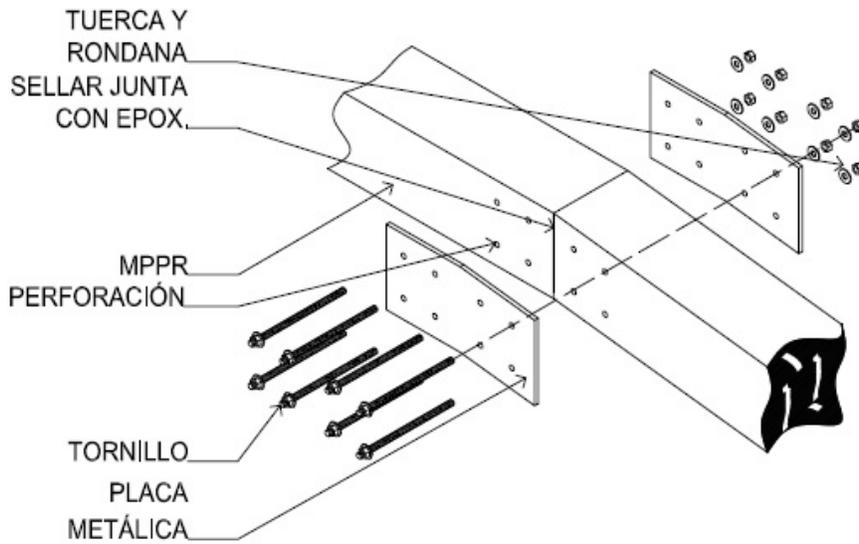


Ilustración 37: Detalle de conexiones. Vista isométrico.

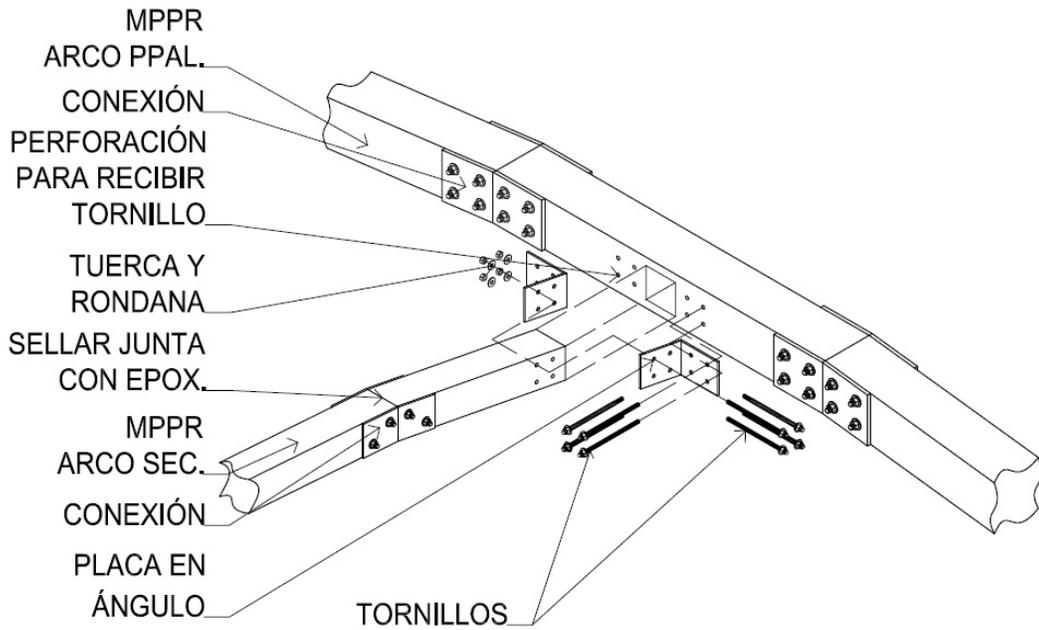


Ilustración 38: Detalle de conexión entre arco secundario y principal. Vista isométrico.

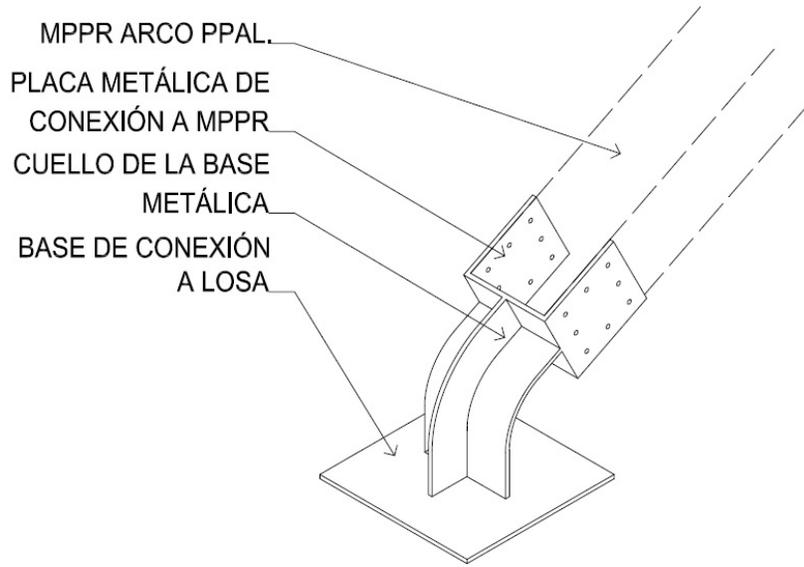


Ilustración 39: Detalle de base metálica de la estructura

4.2 Esfuerzos permisibles de la MPPR de la empresa mexicana

Los cálculos se realizan con base en la norma ASTM D7568-13 que establece las expresiones que delimitan los esfuerzos resistentes y geometrías de los elementos integrantes de un sistema estructural, para garantizar estabilidad de la madera plástica.

4.2.1 Esfuerzos permisibles

El esfuerzo permisible a compresión se calcula como sigue:

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

Ecuación 15

Donde:

Fc'= esfuerzo permisible a compresión

Fc= esfuerzo resistente factorizado a 10 años de carga continua (ecuación 3)

FS= factor de seguridad, 2.5

Ctc= factor de reducción por temperatura

Cp= estabilidad elástica lineal, (1 para el presente caso)

$$F_c = \beta * F_{ct}$$

Ecuación 16

Donde:

β = factor de reducción por 10 años de carga continua

Fct= esfuerzo al 3% de deformación de la prueba

Entonces si se aplica la ecuación a los valores encontrados en las pruebas se obtiene:

$$F_c = 0.78 * 109.78 = 85.62$$

$$F_c' = \left(\frac{85.62}{2.5} \right) * 0.53 * 1 = 18.15 \text{ kg/cm}^2$$

Los factores β y Ctc se obtienen mediante un procedimiento de cálculo que se realiza en los correspondientes subcapítulos.

El esfuerzo permisible a flexión se calcula como sigue:

$$Fb' = \left(\frac{Fb}{FS}\right) * Ctf * Cl$$

Ecuación 17

Donde:

Fb'= esfuerzo permisible a flexión

Fb= esfuerzo resistente factorizado a 10 años de carga continua (ecuación 5)

FS= factor de seguridad, 2.5

Ctf= factor de reducción por temperatura

Cl= estabilidad elástica lineal, (1 para el presente caso)

$$Fb = Fbt * \beta$$

Ecuación 18

Donde:

β = factor de reducción por 10 años de carga continua

Fbt= esfuerzo al 3% de deformación de la prueba

Al aplicar los valores encontrados en las anteriores ecuaciones se obtiene:

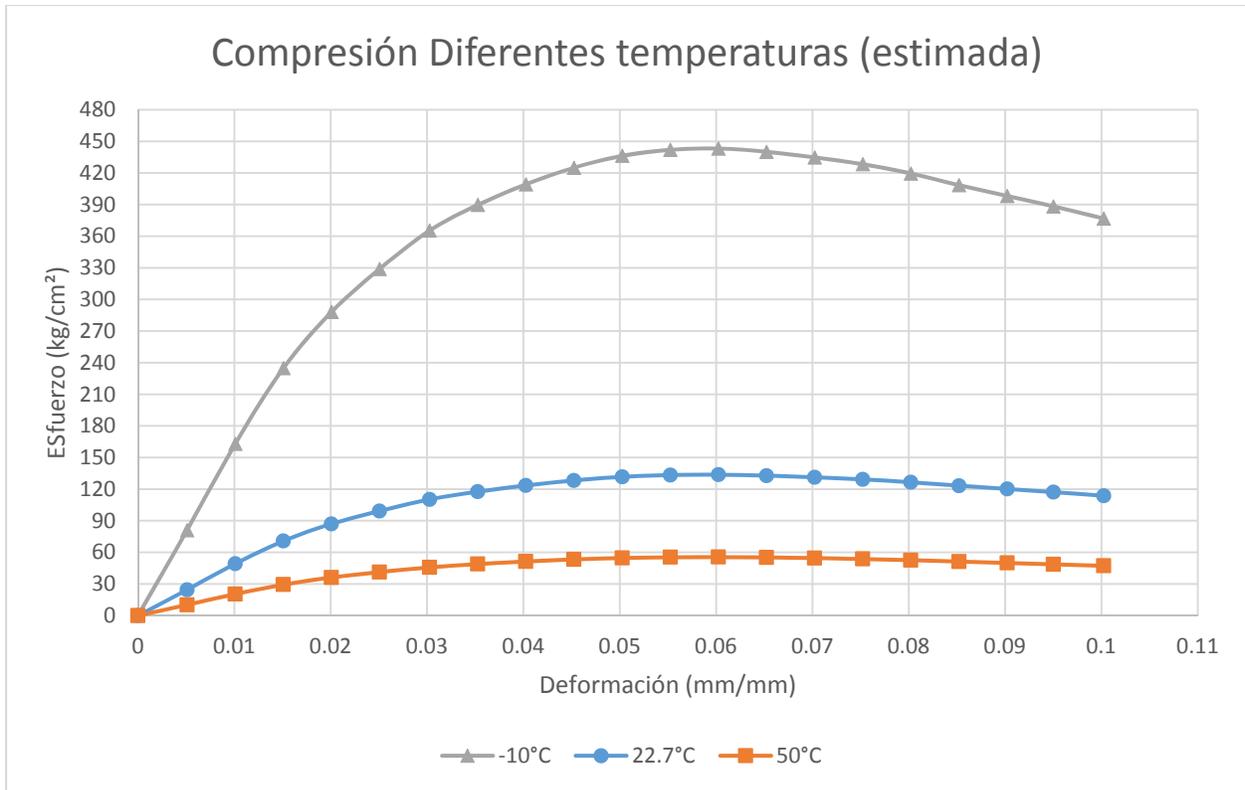
$$Fb = 130.81 * 0.72 = 94.84$$

$$Fc = \left(\frac{94.84}{2.5}\right) * 0.63 * 1 = 23.90 \text{ kg/cm}^2$$

El factor β se obtiene de un cálculo realizado para un material similar de la norma D7568-13 y el factor Ctf de la norma ASTM D6662-03 para madera plástica sin refuerzo y una temperatura de 37.8°C, muy cercana a las condiciones que presenta la Ciudad de México.

4.2.2 Comportamiento teórico a diferentes temperaturas (Ct)

Debido a la falta de equipo necesario para realizar la prueba que corresponde a la determinación del esfuerzo resistente a diferentes temperaturas se procede a utilizar, de manera proporcional, la información que obtuvo (R. Carroll, et al., 2003). En el artículo se estudian las propiedades mecánicas de un producto de madera plástica que tiene propiedades similares a temperatura ambiente con el material que se utiliza en la presente investigación.



Gráfica 14: Compresión estimada a diferentes temperaturas

A partir de los datos obtenidos de la gráfica 14 se determina el factor de reducción por temperatura C_{tc} por medio del método que propone la norma ASTM D7568-13. La norma establece que deben realizarse pruebas a una temperatura baja, $-10 \pm 2^\circ\text{C}$, una temperatura alta, $50 \pm 2^\circ\text{C}$, y una temperatura de control de $23 \pm 2^\circ\text{C}$. Después se calcula el factor de reducción con la siguiente expresión:

$$C_t = \frac{F}{F_{ctl}}$$

Ecuación 19

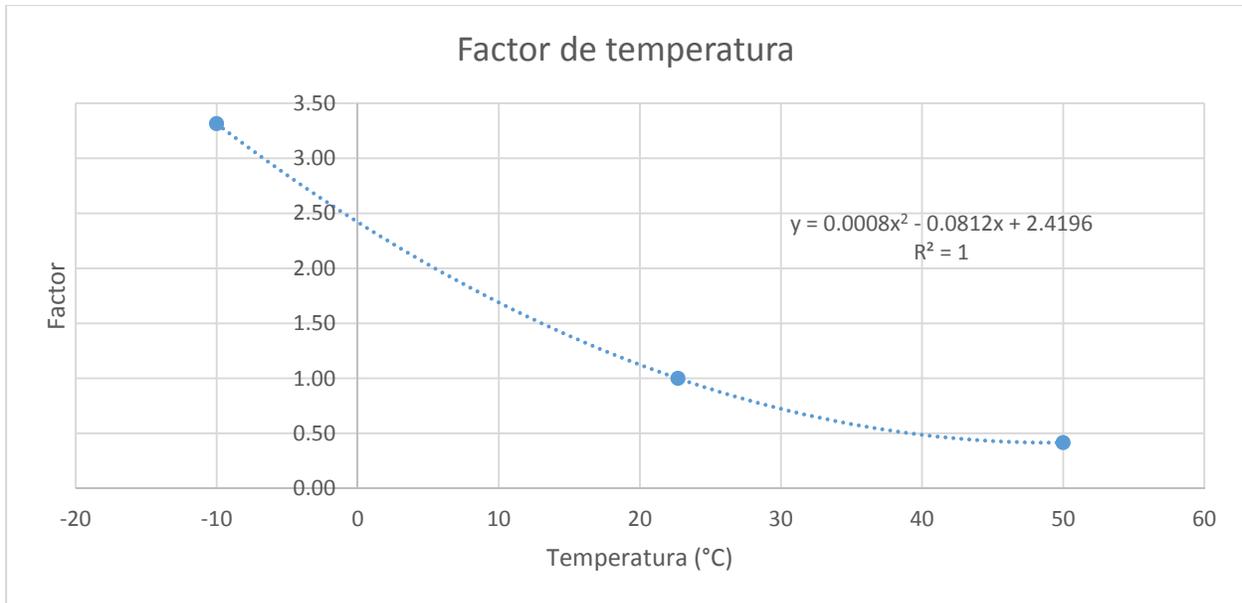
Donde:

C_t = factor de reducción por temperatura

F = esfuerzo al 3% de deformación, para cada temperatura

F_{ctl} = esfuerzo al 3% de deformación a la temperatura de control, $23 \pm 2^\circ\text{C}$

Una vez que se calculan los factores de reducción por temperatura se grafican (factor contra temperatura) y se determina la ecuación polinomial que mejor se ajuste a los puntos. En este caso se utiliza el ajuste polinomial de segundo orden.



Gráfica 15: Factor de temperatura

Se aplica la ecuación para encontrar el factor que se debe utilizar para la Ciudad de México (36°C):

$$Ct = 0.0008(36)^2 - 0.0812(36) + 2.4196 = 0.53$$

Por lo tanto el factor teórico que se debe utilizar es 0.53, sin embargo se recomienda hacer las pruebas correspondientes para encontrar el valor, ya que el material en la prueba de expansión térmica se comporta competitivamente, por lo que se deduce que la variación por temperatura debe resultar menor.

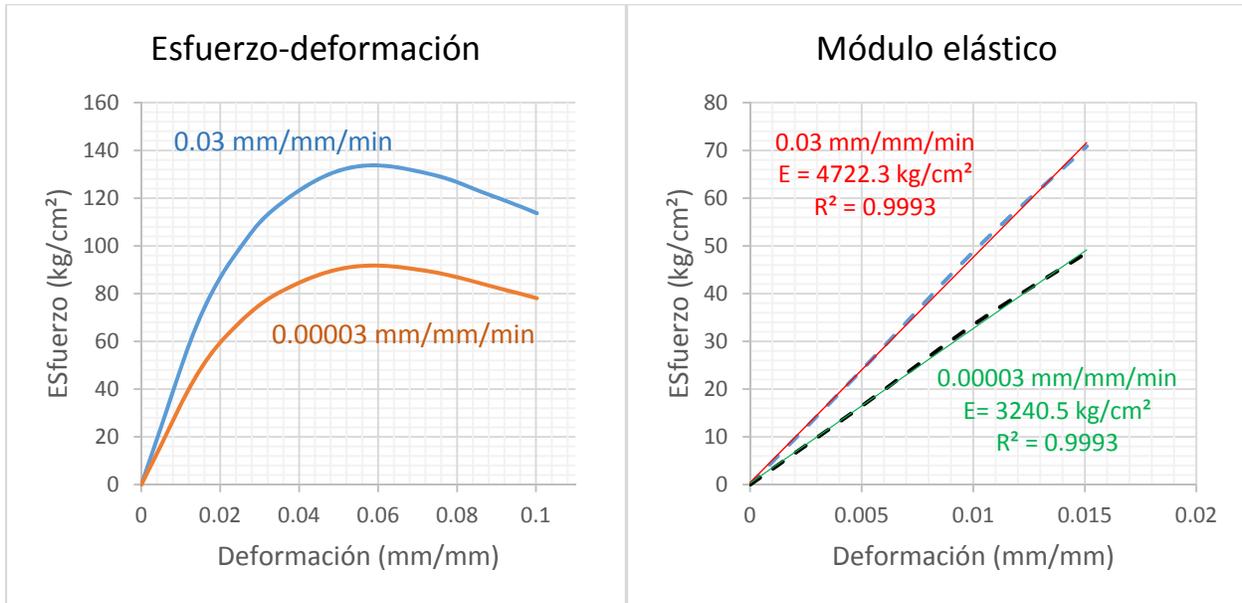
Cabe señalar que la reducción del esfuerzo por temperatura desacelera inversamente, es decir que no mantiene un comportamiento recto.

4.2.3 Comportamiento teórico a 10 años (β)

Existen varios métodos para determinar rápidamente la fluencia de un material viscoelástico, sin tener la necesidad de mantener la probeta por meses. La norma ASTM D7568-13 propone el método Densidad de la Energía de Deformación (SED por sus siglas en inglés).

Para determinar la fluencia del material se propone ensayar un total de cinco probetas a una velocidad constante de 0.03 mm/mm/min y otras cinco probetas a 0.0003 mm/mm/min. La prueba se detiene hasta alcanzar el 0.05 mm/mm de deformación o hasta el punto de ruptura.

En la presente investigación solo se realiza la prueba a la velocidad rápida. La segunda prueba no fue posible realizarla por la capacidad de la maquina universal utilizada, por ello se decide tomar la investigación de (Bozorg-Haddad, Iskander, & Chen, 2012) que estudia las propiedades de fluencia del PEAD reciclado. A partir de dicha información se obtiene la proporción de diferencia entre el ensayo rápido y lento para generar los datos de la prueba lenta en el material que se estudia.



Gráfica 16: Esfuerzos a diferentes velocidades

Después de las pruebas se procede a calcular:

$$SED = \sigma \varepsilon$$

Ecuación 20

Donde:

SED= densidad de la energía de deformación

σ = esfuerzo, kg/cm²

ε = deformación, mm/mm

Una vez obtenido SED para cada esfuerzo registrado hasta el 0.05 mm/mm, se toma el mayor y se divide entre 30 segmentos, para después calcular la deformación, el esfuerzo y el tiempo para cada valor encontrado con la ayuda de las siguientes expresiones:

$$\sigma_{3\%}(t) = A_5 t^5 + A_4 t^4 + A_3 t^3 + A_2 t^2 + A_1 t$$

Ecuación 21

$$SED_{3\%}(\varepsilon) = B_5\varepsilon^5 + B_4\varepsilon^4 + B_3\varepsilon^3 + B_2\varepsilon^2 + B_1\varepsilon$$

Ecuación 22

Donde:

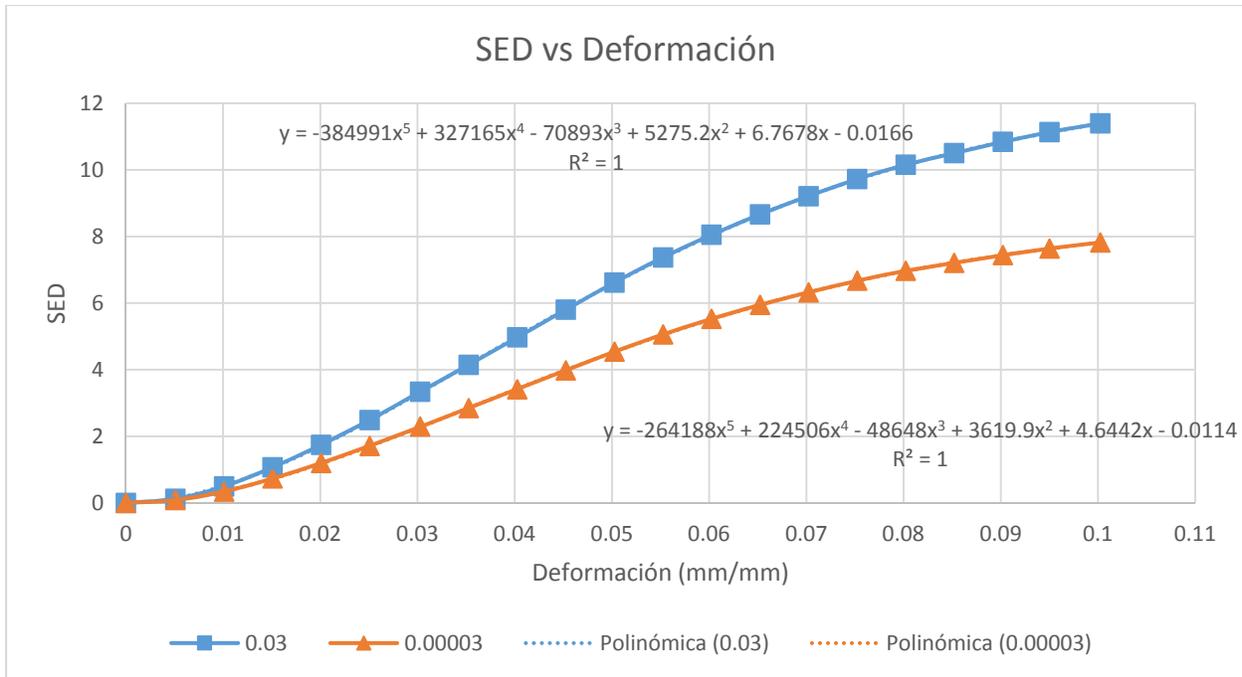
A_x y B_x = constantes de regresión de la curva

t= tiempo

ε = deformación

SED	Velocidad de 0.03 mm/mm/min			Velocidad de 0.00003 mm/mm/min		
	Deformación (mm/mm)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Tiempo (min)	Deformación (mm/mm)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Tiempo (min)
0.2206	0.0063	35.0095	0.2100	0.0078	28.2769	260.0000
0.4411	0.0092	47.9478	0.3067	0.0114	38.6947	380.0000
0.6617	0.0115	57.5374	0.3833	0.0143	46.2713	476.6667
0.8822	0.0136	64.8706	0.4533	0.0169	52.2036	563.3333
1.1028	0.0154	71.6104	0.5133	0.0192	57.4375	640.0000
1.3234	0.0172	76.9395	0.5733	0.0215	61.5516	716.6667
1.5439	0.0188	82.1234	0.6267	0.0236	65.4203	786.6667
1.7645	0.0204	86.4941	0.6800	0.0257	68.6568	856.6667
1.9850	0.0219	90.6411	0.7300	0.0277	71.6621	923.3333
2.2056	0.0233	94.6609	0.7767	0.0296	74.5135	986.6667
2.4262	0.0247	98.2251	0.8233	0.0316	76.7772	1053.3333
2.6467	0.0261	101.4069	0.8700	0.0335	79.0066	1116.6667
2.8673	0.0275	104.2647	0.9167	0.0354	80.9966	1180.0000
3.0878	0.0289	106.8457	0.9633	0.0373	82.7839	1243.3333
3.3084	0.0302	109.5497	1.0067	0.0392	84.3980	1306.6667
3.5290	0.0315	112.0305	1.0500	0.0411	85.8628	1370.0000
3.7495	0.0328	114.3146	1.0933	0.0431	86.9958	1436.6667
3.9701	0.0341	116.4246	1.1367	0.045	88.2240	1500.0000
4.1906	0.0355	118.0462	1.1833	0.047	89.1626	1566.6667
4.4112	0.0368	119.8696	1.2267	0.0491	89.8411	1636.6667
4.6318	0.0381	121.5685	1.2700	0.0516	89.7628	1720.0000
4.8523	0.0394	123.1553	1.3133	0.0533	91.0379	1776.6667
5.0729	0.0407	124.6408	1.3567	0.0555	91.4032	1850.0000
5.2934	0.042	126.0343	1.4000	0.0578	91.5820	1926.6667
5.5140	0.0434	127.0507	1.4467	0.0602	91.5947	2006.6667
5.7346	0.0447	128.2899	1.4900	0.0627	91.4603	2090.0000
5.9551	0.0461	129.1783	1.5367	0.0654	91.0569	2180.0000
6.1757	0.0474	130.2886	1.5800	0.0682	90.5525	2273.3333
6.3962	0.0489	130.8025	1.6300	0.0712	89.8348	2373.3333
6.6168	0.0502	131.8088	1.6733	0.0744	88.9355	2480.0000

Tabla 16: Resultados de la ecuación



Gráfica 17: SED vs Deformación resultantes

La ecuación 9 se aplica para 0.03 mm/mm/min y se calcula la incógnita en el software Wolfram Mathematica como sigue:

$$0.2206 = -384991\varepsilon^5 + 327165\varepsilon^4 - 70893\varepsilon^3 + 5275.2\varepsilon^2 + 6.7678\varepsilon - 0.0166$$

$$\varepsilon = 0.0063 \text{ mm/mm}$$

Y para 0.00003 mm/mm/min:

$$0.2206 = -264188\varepsilon^5 + 224506\varepsilon^4 - 48648\varepsilon^3 + 3619.9\varepsilon^2 + 4.6442\varepsilon - 0.0114$$

$$\varepsilon = 0.0078 \text{ mm/mm}$$

A partir de los datos de la tabla anterior se calcula para cada valor:

$$m = \frac{\log\left(\frac{\varepsilon_{0.003\%}}{\varepsilon_{3\%}}\right)}{\log\left(\frac{\varepsilon'_{3\%}}{\varepsilon'_{0.003\%}}\right)}$$

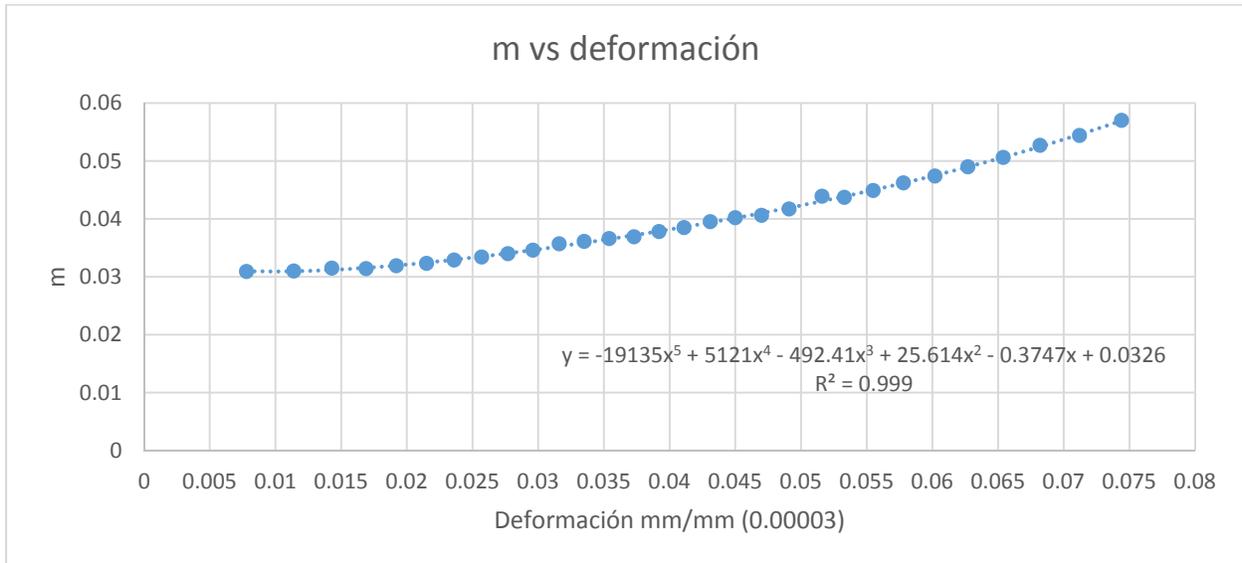
Ecuación 23

Donde:

ε = deformación calculada

ε' = velocidad de deformación

Calculados todos los valores m para cada sección SED se continúa elaborando la gráfica m vs deformación lenta (por ser la más crítica) y se calcula la regresión polimial de quinto orden.



Gráfica 18: m vs deformación

El cálculo anterior tiene la finalidad de integrarse como exponente para determinar los esfuerzos resistentes que tendrá el material durante 10 años.

$$\sigma_{10} = \sigma_{0.003\%/min} * (\varepsilon'_{10} / \varepsilon'_{0.003\%})^{m(\sigma\varepsilon)}$$

Ecuación 24

Donde:

σ_{10} = esfuerzo estimado a 10 años, kg/cm²

$\sigma_{0.003\%/min}$ = esfuerzo para cada valor SED del ensayo 0.003%/min

$\varepsilon'_{10} = \varepsilon_f / (5\ 256\ 000\ min)$

$\varepsilon'_{0.003\%}$ = velocidad de la prueba

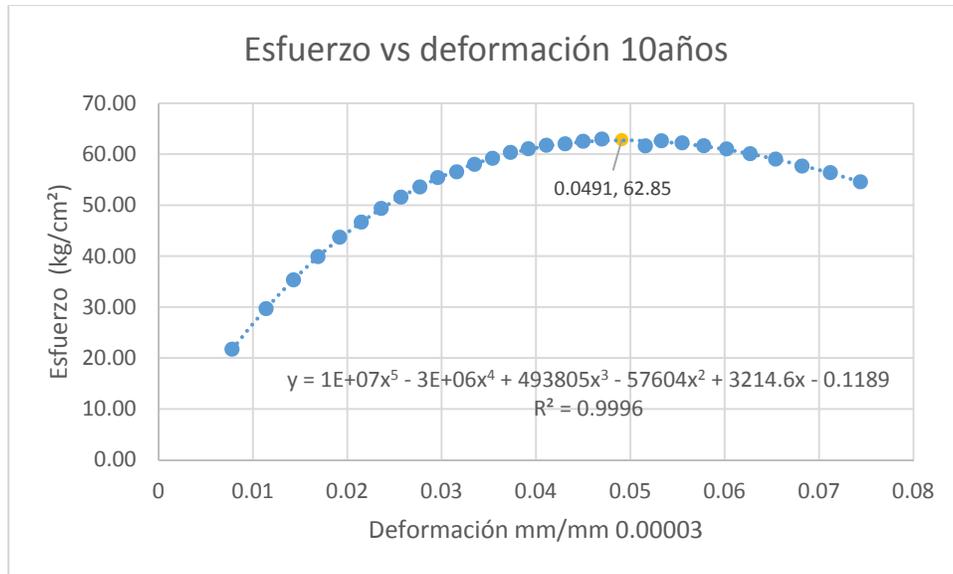
$m(\sigma\varepsilon)$ = m en función de cada SED

$\varepsilon_f = 0.03$

Se aplica la ecuación 11 para cada fracción del SED de la siguiente manera:

$$\sigma_{10} = 28.28 * (0.03/5\ 256\ 000/0.00003)^{0.0309} = 21.70\ kg/cm^2$$

Después se grafica lo que se calcula cruzando los datos con la deformación lenta.



Gráfica 19: Esfuerzo-deformación estimada a 10 años

La grafica superior recopila la información del esfuerzo resistente predicho para 10 años de uso. Indica una reducción importante del esfuerzo resistente probado, con 62.85 kg/cm², más de 50% menor del esfuerzo alcanzado en el ensayo: 132.13 kg/cm².

Para obtener la deformación a la falla estimada inicial se aplica la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_{f,i} = (\varepsilon_f / 2) * (1 + n_c)$$

Ecuación 25

Donde:

$\varepsilon_{f,i}$ = deformación a la falla estimada inicial

ε_f = 0.03

n_c = exponente de fluencia estimado inicial, 0.05

Al utilizar la ecuación se obtiene:

$$\varepsilon_{f,i} = (0.03/2) * (1 + 0.05) = 0.0157 \text{ mm/mm}$$

Ahora, para generar el esfuerzo a la falla inicial se utiliza la regresión polinomial de la gráfica 6:

$$\sigma_{10}(\varepsilon) = 1E + 07\varepsilon^5 - 3E + 06\varepsilon^4 + 493805\varepsilon^3 - 57604\varepsilon^2 + 3214.6\varepsilon - 0.1189$$

Ecuación 26

Donde:

$\sigma_{10}(\varepsilon)$ = esfuerzo estimado a la falla inicial en función de la deformación a la falla inicial

ε = deformación a la falla inicial

De la ecuación 13 se sustituye el valor de deformación a la falla inicial:

$$\begin{aligned} \sigma_{10}(\varepsilon) &= 1E + 07(0.0157)^5 - 3E + 06(0.0157)^4 + 493805(0.0157)^3 \\ &\quad - 57604(0.0157)^2 + 3214.6(0.0157) - 0.1189 = 37.98 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

Lo siguiente es calcular n_c definitivo que se realiza con la siguiente expresión:

$$n_c = \frac{\log\left(\frac{\varepsilon_{0.003\%}}{\varepsilon_{3\%}}\right)}{\log\left(\frac{t_{3\%}}{t_{0.003\%}}\right)}$$

Ecuación 27

Donde:

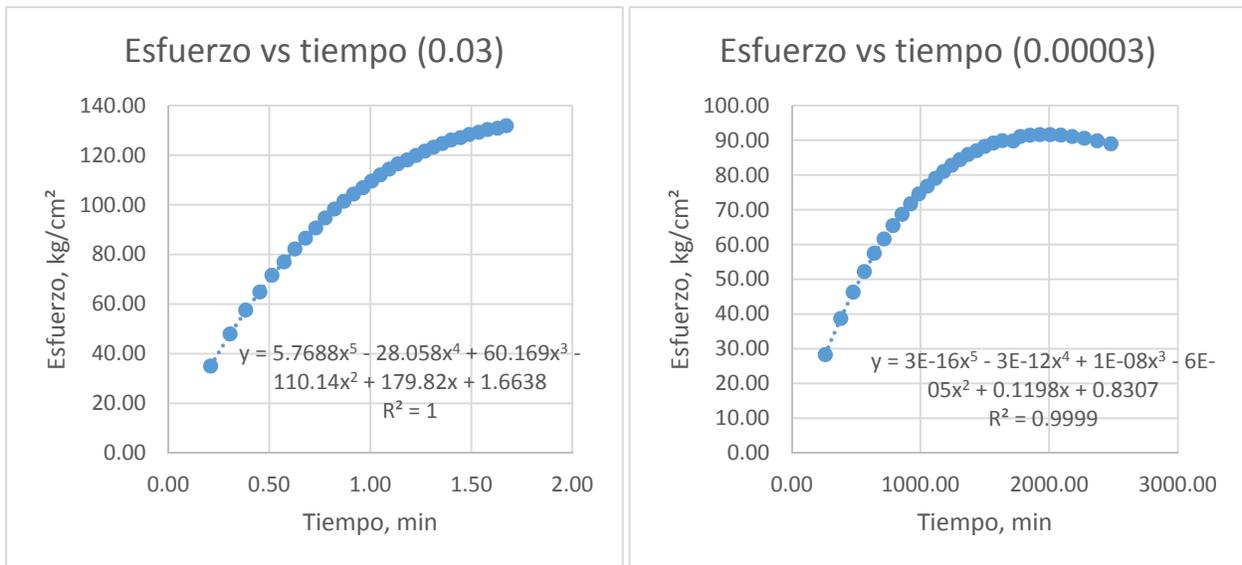
$\varepsilon_{0.003\%}$ = deformación del ensayo 0.00003 mm/mm/min en función del tiempo calculado

$\varepsilon_{3\%}$ = deformación del ensayo mm/mm/min en función del tiempo calculado

$t_{0.003\%}$ = tiempo calculado del ensayo 0.00003 mm/mm/min

$t_{3\%}$ = tiempo calculado del ensayo 0.03 mm/mm/min

El tiempo se calcula a partir de la gráfica que reúne los datos del esfuerzo en función del tiempo para cada uno de los ensayos y el cálculo de la regresión polinomial de quinto orden. Ver grafica 7.



Gráfica 20: Esfuerzo-tiempo para los dos ensayos

El ajuste de ambas curvas se calcula por medio de la regresión polinomial de quinto orden:

$$\sigma_{0.003\%}(t) = 3E-16t^5 - 3E-12t^4 + 1E-08t^3 - 6E-05t^2 + 0.1198t + 0.8307$$

Ecuación 28

$$\sigma_{3\%}(t) = 5.7688t^5 - 28.058t^4 + 60.169t^3 - 110.14t^2 + 179.82t + 1.6638$$

Ecuación 29

Donde:

$\sigma_{0.003\%}(t)$ y $\sigma_{3\%}(t)$ = esfuerzo en función del tiempo

t = tiempo, min

Las ecuaciones 15 y 16 se utilizan para calcular el tiempo que trabaja como función del esfuerzo estimado a falla para 10 años ($\sigma_{f,10}$) a través de las siguientes expresiones:

$$\sigma_{f,10} = \frac{\int_0^{t_{r2}} \sigma_{0.003\%}(t) dt}{\int_0^{t_{r2}} dt}$$

Ecuación 30

$$\sigma_{f,10} = \frac{\int_0^{t_{r1}} \sigma_{3\%}(t) dt}{\int_0^{t_{r1}} dt}$$

Ecuación 31

Donde:

$\sigma_{f,10}$ = esfuerzo estimado de falla a 10 años

$\sigma_{0.003\%}(t)$ y $\sigma_{3\%}(t)$ = esfuerzo en función del tiempo

Se sustituyen la función y el valor del esfuerzo estimado de falla a 10 años y se obtiene lo siguiente para el ensayo 0.003%/min:

$$37.98 = \frac{\int_0^{t_{r2}} 3E-16t^5 - 3E-12t^4 + 1E-08t^3 - 6E-05t^2 + 0.1198t + 0.8307}{\int_0^{t_{r2}} dt}$$

$$t = 831.5 \text{ min}$$

$$\varepsilon = (\varepsilon'_{0.003\%})(t) = (0.00003)(831.5) = 0.0249 \text{ mm/mm}$$

Y para el ensayo 3%/min:

$$37.98 = \frac{\int_0^{t_{r1}} 5.7688t^5 - 28.058t^4 + 60.169t^3 - 110.14t^2 + 179.82t + 1.6638}{\int_0^{t_{r1}} dt}$$

$$t = 0.4836 \text{ min}$$

$$\varepsilon = (\varepsilon'_{3\%})(t) = (0.03)(0.4836) = 0.0145 \text{ mm/mm}$$

A partir de los datos encontrados se sustituyen los valores de la ecuación 14 y se obtiene:

$$n_c = \frac{\log\left(\frac{0.0249}{0.0145}\right)}{\log\left(\frac{831.5}{0.4836}\right)} = 0.07$$

Una vez calculado n_c se tiene la información necesaria para generar la deformación final del esfuerzo de falla a 10 años mediante la siguiente expresión:

$$\varepsilon_{f,c} = (\varepsilon_f/2) * (1 + n_c)$$

Ecuación 32

Donde:

$\varepsilon_{f,c}$ = deformación a la falla estimada final

$\varepsilon_f = 0.03$

n_c = exponente de fluencia estimado inicial, calculado

Se sustituyen los valores de la ecuación 19 y resulta:

$$\varepsilon_{f,i} = (0.03/2) * (1 + 0.07) = 0.0161 \text{ mm/mm}$$

Esta nueva deformación se utiliza para generar el esfuerzo a la falla a 10 años:

$$\sigma_{10}(\varepsilon) = 1E + 07(0.0161)^5 - 3E + 06(0.0161)^4 + 493805(0.0161)^3 - 57604(0.0161)^2 + 3214.6(0.0161) - 0.1189 = 38.56 \text{ kg/cm}^2$$

Calculados el esfuerzo y la deformación a falla es posible general el factor β :

$$\beta = \sigma_{f,10} / F_{bt}$$

Ecuación 33

Donde:

$\sigma_{f,10}$ = esfuerzo estimado de falla a 10 años

F_{bt} = esfuerzo experimental cercano a la misma deformación obtenida anteriormente

Por lo tanto el factor β es igual a:

$$\beta = 38.56 / 49.20 = 0.78$$

Y el módulo de elasticidad para 10 años de servicio se obtiene:

$$E_{10} = \frac{\sigma_{f,10}}{\varepsilon_{f,c}}$$

Ecuación 34

Donde:

$\sigma_{f,10}$ = esfuerzo estimado de falla a 10 años

$\varepsilon_{f,c}$ = deformación estimada de falla a 10 años

Por lo tanto:

$$E_{10} = \frac{38.16}{0.0161} = 2396.32 \text{ kg/cm}^2$$

4.2.4 Análisis de cargas

El análisis de cargas se realiza a partir de lo indicado en las normas técnicas complementarias sobre estructuras para el Distrito Federal, donde se obtienen las cargas vivas para cubiertas con pendiente mayor al 5%. Además se analizan las cargas que van a recibir los elementos estructurales como una cubierta de policarbonato e instalaciones. El resumen de dicho análisis se puede consultar en la siguiente tabla.

Análisis de cargas		
Cargas muertas		
Cubierta de policarbonato 16mm	3.35	kg/m^2 Datos técnicos del material
Instalaciones	10	kg/m^2 Propuesto
Cargas vivas		
Pendiente mayor 5%	40	kg/m^2 Normas técnicas complementarias
Total	53.35	kg/m^2
Áreas tributarias		
Distancia entre arcos secundarios (eje x)	1.4 m	74.69 kg/m

Tabla 17: Análisis de cargas

El número marcado en la tabla superior con un color distinto es la carga por metro lineal que se utiliza para realizar el cálculo general de la cubierta.

4.3 Evaluación del modelo digital

4.3.1 Análisis del sistema

El análisis del sistema estructura propuesto arroja que si se calculan sólo los elementos críticos, se resuelve el sistema completo, por lo tanto se definen como críticos: 1) los arcos principales 4 y 8, por las cargas a compresión importantes del primero y las cargas a flexión importantes del segundo; 2) los arcos secundarios B 4-5, B 7-8, F 4-5 y F 7-8. De dichos arcos se consideran el elemento inferior y el central para su estudio detallado.

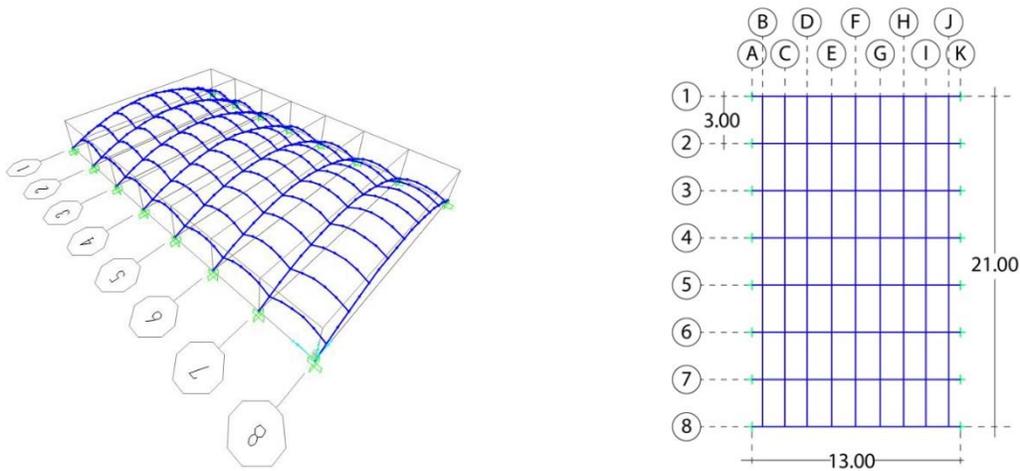


Ilustración 40: Perspectiva (izquierda), Planta (derecha)

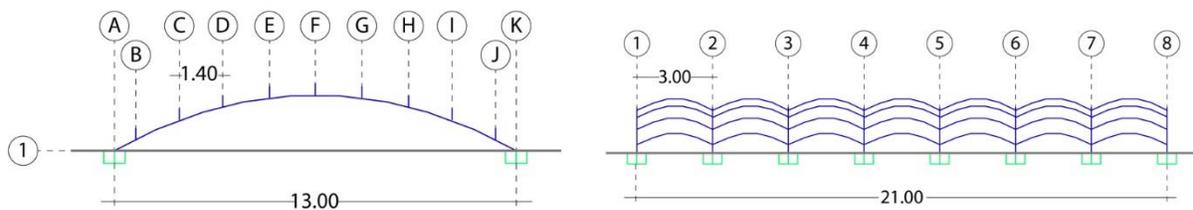


Ilustración 41: Alzado frontal (izquierda), Alzado lateral (derecha)

Las dos ilustraciones anteriores muestran el trazo completo de la estructura en el software SAP2000. La planta y los alzados se realizan en un software diferente para nombrar correctamente a cada uno de los arcos y no se genere confusión. Se colocan las medidas generales del sistema estructural, sin embargo si se desea conocer a detalle el trazo se recomienda ver el subcapítulo Trazo del presente documento.

Arcos principales			Arcos secundarios					
4	Inferior	Central	B 4-5	Inferior	Central	B 7-8	Inferior	Central
Compresión (kgf)	2452.19	2142.23	206.61	168.48		164.50	122.14	
Flexión eje z (kg*m)	50.19	53.95	1.50	6.91		24.52	19.80	
Flexión eje y (kg*m)	4.89	0.06	17.37	0.67		33.88	12.72	
Deflexión eje z (cm)	0.00	0.83	0.00	0.03		0.05	0.10	
Deflexión eje y (cm)	0.00	0.00	0.00	0.00		0.23	0.04	
8	Inferior	Central	F 4-5	Inferior	Central	F 7-8	Inferior	Central
Compresión (kgf)	1120.53	929.98	56.80	4.27		48.11	4.90	
Flexión eje z (kg*m)	26.73	20.01	31.74	31.41		36.50	29.80	
Flexión eje y (kg*m)	85.95	5.39	0.00	0.00		0.00	0.00	
Deflexión eje z (cm)	0.19	0.36	0.22	0.00		0.21	0.29	
Deflexión eje y (cm)	0.23	0.26	0.00	0.00		0.00	0.00	

Tabla 18: Cargas y deflexiones que actúan sobre los elementos críticos

4.3.2 Evaluación

Se realiza la evaluación del sistema solo a dos tipos de esfuerzos: compresión y flexión, ya que los esfuerzos a tensión no son significativos y además no existe un procedimiento de cálculo para realizar la respectiva evaluación.

La evaluación por compresión se realiza calculando el esfuerzo resistente de la pieza de madera plástica que se propone, es decir una pieza de 15cm x 15cm y otra de 10cm x 10cm, y verificando que el resultado sea mayor a la carga recibida.

$$F_{c \text{ sección}} = Fc' * A$$

Ecuación 35

Donde:

$F_{c \text{ sección}}$ = esfuerzo resistente de la sección

Fc' = esfuerzo permisible

A = área de la sección

Por lo tanto:

$$18.15 * 15 * 15 = 4083.75 \text{ kg/cm}^2$$

Y

$$18.15 * 10 * 10 = 1815 \text{ kg/cm}^2$$

Se revisan las cargas (ver tabla 18) que reciben todos los elementos críticos y se concluye que las secciones propuestas son capaces de resistir los esfuerzos a compresión que requiere el sistema.

La relación de esbeltez debe cumplir la siguiente expresión:

$$S_r = \frac{KL_u}{r} < 28$$

Ecuación 36

Donde:

S_r = relación de esbeltez

K= coeficiente de pandeo que depende de los apoyos del elemento

L_u = largo efectivo del elemento, cm

r= radio de giro

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

Ecuación 37

Donde:

r= radio de giro

I= momento de inercia del eje más débil

A= área de la sección

Por lo tanto para las piezas del arco principal se tiene:

$$I = \frac{bh^3}{12}$$

Ecuación 38

Donde:

I= momento de inercia

b= base de la sección

h= altura de la sección

$$I = \frac{15 * 15^3}{12} = 4218.15cm^4$$

$$r = \sqrt{\frac{4218.75}{225}} = 4.33$$

$$S_r = \frac{0.5 * 153}{4.33} = 17.67$$

Y para los elementos de los arcos secundarios se tiene:

$$I = \frac{10 * 10^3}{12} = 833.33cm^4$$

$$r = \sqrt{\frac{833,33}{100}} = 2.89$$

$$S_r = \frac{0.5 * 56}{2.89} = 9.70$$

Entonces los elementos cumplen con la relación de esbeltez que se requiere.

Se procede a calcular los momentos permisibles de ambas sección para evaluar si los elementos que se proponen tienen la resistencia adecuada:

$$M = \frac{I}{c} Fb'$$

Ecuación 39

Donde:

M= momento resistente

I= momento de inercia

c= centroide con respecto al eje que se calcula

Fb'= esfuerzo permisible

Por lo tanto para los elementos de los arcos principales se tiene:

$$M = \frac{4218.15}{7.5} (23.90) = 13443.18 \text{ kg} * \text{cm} = 134.43 \text{ kg} * \text{m}$$

Y para los elementos de los arcos secundarios se tiene:

$$M = \frac{833.33}{5} (23.90) = 3983.32 \text{ kg} * \text{cm} = 39.83 \text{ kg} * \text{m}$$

Se concluye que los elementos propuestos tienen la capacidad de resistir los momentos flexionantes que generan.

La flecha permisible que sugiere la norma ASTM D7568-13 para elementos con carga uniformemente repartida se delimita con la siguiente expresión:

$$\delta_{permisible} = \frac{L}{180}$$

Ecuación 40

Donde:

$\delta_{permisible}$ = flecha permisible, cm

L= dimensión del calor, cm

Por lo tanto para los elementos del arco principal se tiene:

$$\delta_{permisible} = \frac{153}{180} = 0.85cm$$

Y para las piezas que pertenecen a los arcos secundarios:

$$\delta_{permisible} = \frac{56}{180} = 0.31cm$$

Se revisan las deflexiones que genera el sistema propuesto y se concluye que ninguna supera las flechas permisibles calculadas para ambos tipos de elementos.

Por último se realiza la evaluación por esfuerzo combinado flexo-compresión para cada elemento crítico que se define en el subcapítulo anterior por medio de las siguientes expresiones:

$$\frac{P/A}{F_c'} + \frac{M/S}{F_b'} \leq 1$$

Ecuación 41

Donde:

P= carga a compresión recibida

A= área de la sección del elemento

F_c'= esfuerzo permisible a compresión

M= momento máximo

S= módulo de sección

F_b'= esfuerzo permisible a flexión

$$S = \frac{I}{c}$$

Ecuación 42

Donde:

S= módulo de sección

I= momento de inercia

c= centroide del eje que se revisa

Por lo tanto se tiene:

Arco principal: 4 inferior

$$S = \frac{4218.75}{7.5} = 562.5$$

$$\frac{2452.19/225}{18.15} + \frac{5019/562.25}{23.90} = 0.97$$

Arco principal: 4 central

$$\frac{2142.23/225}{18.15} + \frac{5395/562.25}{23.90} = 0.93$$

Arco principal: 8 inferior

$$\frac{1120.53/225}{18.15} + \frac{8595/562.25}{23.90} = 0.91$$

Arco principal: 8 central

$$\frac{929.98/225}{18.15} + \frac{2001/562.25}{23.90} = 0.37$$

Arco secundario: B 4-5 inferior

$$S = \frac{833.33}{5} = 166.66$$

$$\frac{206.61/100}{18.15} + \frac{1737/166.66}{23.90} = 0.54$$

Arco secundario: B 4-5 central

$$\frac{168.48/100}{18.15} + \frac{691/166.66}{23.90} = 0.27$$

Arco secundario: F 4-5 inferior

$$\frac{56.80/100}{18.15} + \frac{3174/166.66}{23.90} = 0.83$$

Arco secundario: F 4-5 central

$$\frac{4.27/100}{18.15} + \frac{3141/166.66}{23.90} = 0.79$$

Arco secundario: B 7-8 inferior

$$\frac{164.50/100}{18.15} + \frac{3388/166.66}{23.90} = 0.94$$

Arco secundario: B 7-8 central

$$\frac{122.14/100}{18.15} + \frac{1980/166.66}{23.90} = 0.56$$

Arco secundario: F 7-8 inferior

$$\frac{48.11/100}{18.15} + \frac{3650/166.66}{23.90} = 0.94$$

Arco secundario: F 7-8 central

$$\frac{4.90/100}{18.15} + \frac{2980/166.66}{23.90} = 0.75$$

Los cálculos del esfuerzo combinado de cada elemento confirman que todas las piezas críticas cumplen la condición establecida para dicho esfuerzo.

Se concluye que los elementos evaluados tienen la capacidad de resistir la cubierta planteada con una sección para los arcos principales de 15cm x 15cm y para los arcos secundarios de 10cm x 10cm.

5. Conclusión

Actualmente, existen en el mercado una variedad muy grande de materiales para la construcción, dando al arquitecto proyectista una vasta gama de posibilidades para crear ambientes arquitectónicos capaces de sorprender a los usuarios. La madera plástica de plástico reciclado entra en este mercado pero con un origen y propiedades que lo hacen totalmente diferente del resto de materiales.

La madera plástica cuando se elabora con material polimérico reciclado, no solo cubre las necesidades propias de la aplicación que se le destine, sino que también ayuda a mejorar el ambiente natural que nos rodea, al reducir la basura plástica que se acumula en los vertederos. Por lo tanto es un material que reutiliza lo que alguna vez fue un contenedor de plástico para convertirlo en un elemento integrante de un ambiente arquitectónico.

Las propiedades generales de la madera plástica son las mismas que rigen a los polímeros de tipo termoplásticos, por lo tanto debe considerarse su comportamiento bajo cargas totalmente distinto a la madera natural. Cambio de esfuerzos resistentes por temperatura, dependencia al tiempo de carga, la sección y deformación son las propiedades que más la distinguen del resto de los materiales.

También se distingue del resto de los materiales por la diferencia de las propiedades de la madera plástica entre las compañías que la fabrican. Cada empresa utiliza sus propias tecnologías para elaborarla, con diferentes aditivos y métodos de fabricación. Es imposible establecer un estándar de aplicación que cubra los distintos comportamientos de la madera plástica que se producen en todo el mundo. Cada empresa debe establecer sus propias especificaciones, con el fin de evitar fallas del material.

La madera plástica ha evolucionado mucho desde su nacimiento, tanto que hoy en día se pueden encontrar productos que incluso se utilizan para construir puentes. Estos productos se refuerzan con fibras de vidrio alineadas para conseguir que el material gane rigidez. Pero las aplicaciones

de la madera plástica en México se limitan a la construcción de elementos de poca exigencia de esfuerzos. Aún le falta crecimiento y evolución al producto. Se ofrece madera plástica principalmente para recubrimiento de muros, pisos y elementos decorativos de jardines.

En México se fabrica madera plástica y en la presente investigación se buscan las propiedades para determinar los alcances de este producto. Después de una serie de información sobre la madera plástica conseguida en la literatura, un análisis de los productores nacionales, un estudio de las propiedades de los polímeros, una serie de pruebas en los laboratorios de propiedades mecánicas y análisis matemáticos se concluye que la madera plástica fabricada por la empresa elegida tiene propiedades mejores a las especificadas por la misma³¹.

La madera plástica que produce la empresa mexicana y que se estudia en la presente investigación es un material que se comporta similar a lo publicado en la literatura, sin embargo las diferencias que se encontraron en el comportamiento térmico, es decir con la prueba de expansión térmica, permite inferir que el material puede comportarse mas estable, comparándola con la madera plástica de la investigación de (R. Carroll, et al., 2003). A pesar de que ambos productos están fabricados con el mismo tipo de plástico reciclado, PEAD, y las propiedades mecánicas son similares, el comportamiento térmico en la MPPR de la empresa mexicana es mejor.

La deformación que presenta la MPPR de la empresa mexicana cuando es sometida a cualquier esfuerzo es considerable. Por ejemplo: un concreto de 150 kg/cm² apenas se deforma cuando alcanza un esfuerzo a compresión recibido de 109.78 kg/cm², en cambio la MPPR se deforma un total de 0.03 mm/mm. es decir, mientras el concreto se deforma imperceptiblemente, la MPPR lo hace al 3%, siendo muy evidente a simple vista.

A pesar de la deformación pronunciada, la madera plástica no produce fractura inmediatamente después de la falla. Resiste la presión y sigue deformándose hasta fracturarse gradualmente, sin producir la destrucción del material. Además sigue resistiendo el esfuerzo. Por lo tanto el material se considera como altamente tenaz. Esta propiedad le confiere al material la capacidad de resistir esfuerzos incluso cuando la deformación es considerable, lo cual permite al usuario percatarse de la inestabilidad de la estructura antes de que colapse.

Si se le aplica un esfuerzo de flexión al material, este produce una mayor deformación en comparación con un esfuerzo de compresión. Aunque en los resultados expresan deformaciones similares a cargas iguales, la flecha que presenta en la prueba de flexión es de 55mm sin ocurrir

³¹ Ver cuadro de propiedades de la madera plástica, Pag. 81.

ruptura en un probeta de 860mm, con una deformación unitaria del 3% en las fibras exteriores, en cambio en la prueba de compresión presentó en la misma deformación unitaria un desplazamiento de 6mm con una probeta de 200mm de altura. Se necesitaría una probeta de 1833mm para conseguir una deformación de 55mm en la prueba de compresión. La falta de rigidez del material provoca las deformaciones tan pronunciadas bajo los esfuerzos de flexión. Es por ello que el esfuerzo a compresión es preferible al de flexión.

Se desprecia, por recomendación de las normas ASTM, el esfuerzo a tensión del material y por lo tanto la madera plástica de la empresa mexicana tiene mejores posibilidades de uso estructural cuando se aplica en elementos que reciban esfuerzos a compresión.

El comportamiento mecánico del material no se puede clasificar solo como un material elástico o plástico, que es el comportamiento más común de los materiales de la construcción. Se clasifica como un material viscoelástico, es decir, cuando el material recibe un esfuerzo (no importa qué clase de esfuerzo) se deforma conforme a la magnitud del mismo, pero cuando el esfuerzo no supera el límite viscoelástico del material (alrededor del 3% de deformación unitaria) y cesa de aplicarse, el material recupera su forma original lentamente. Es visible esta clase de comportamiento en las gráficas de esfuerzo-deformación con una línea curva ascendente³².

La suma de los resultados demuestran que la madera plástica de PEAD reciclado fabricada por la empresa mexicana es un material capaz de resistir esfuerzos de compresión (esfuerzo preferible para el material) de hasta 109.78 kg/cm² sin sufrir falla, por lo tanto se decide aplicarlo como cubierta de un objeto arquitectónico teórico para comprobar su eficiencia, ya que al tener que resistir solo su propio peso, tiene mejores posibilidades de aplicación.

La geometría que se ajusta al esfuerzo preferible, es decir, compresión, para fungir como cubierta es el arco, siendo el arco de tipo anti-funcular el que mejor aísla los esfuerzos recibidos para convertirlos en compresión. Los resultados positivos en el análisis matemático comprueban lo antes escrito.

La hipótesis de la investigación es aprobada con base a la combinación de resultados, tanto de los experimentos como del análisis matemático, por lo tanto la madera plástica de PEAD reciclado de la empresa mexicana tiene la capacidad para utilizarse en elementos portantes cuando se aplica en sistemas estructurales que, mayormente generan compresión, como es el caso de las cubiertas de arcos anti-funculares.

³² Ver gráfica en Pag. 79.

Recomendaciones para su uso en la arquitectura mexicana

El Polietileno de Alta Densidad es uno de los polímeros más consumidos en México. Es considerado como el segundo con mejores posibilidades de reciclado. La investigación del ciclo de vida del PEAD en botellas apoya su reciclado. Además, Platt, B. et. al. (2005) en su investigación recomienda ampliamente la madera plástica hecha con este material. Por lo tanto se recomienda en esta investigación utilizar madera plástica de PEAD reciclado sobre cualquier otro tipo.

En el desarrollo de esta investigación se comprendió que la temperatura es un factor que afecta drásticamente el comportamiento de la madera plástica. La expansión térmica y la reducción de la resistencia por altas temperaturas son los cambios que se presentan en el material. Por ello se debe estudiar el material de acuerdo al lugar donde se pretende ubicar, para evitar fallas por este factor.

La MPPR de la empresa mexicana es totalmente distinta a la madera natural. Los esfuerzos resistentes, el comportamiento bajo condiciones de humedad y temperatura son diferentes. Jamás se deben aplicar los valores resistentes o los métodos de diseño estructural de la madera natural en la madera plástica.

Es responsabilidad del arquitecto e ingeniero revisar cuidadosamente las especificaciones de la madera plástica que se adquiere, así como seguir las sugerencias establecidas por la compañía que lo produce. Jamás se deben tomar las especificaciones de una empresa diferente de la que se adquirió el producto.

Cuando se requiera utilizar la madera plástica en lugares donde la temperatura sea mayor a la ciudad de México, se recomienda estudiar cuidadosamente el comportamiento del material bajo aquella temperatura. Si los resultados del estudio son negativos se recomienda evitar construir elementos portantes con la madera plástica, a menos que se utilice al interior de un edificio con ambiente controlado o que la temperatura sea naturalmente similar a la Ciudad de México.

Los arcos anti-funiculares son capaces de distribuir y aislar adecuadamente los esfuerzos para que la madera plástica de la empresa mexicana actúe en un sistema estructural como material portante. Se recomienda utilizar esta geometría con una relación de 1/7 entre la flecha del arco y el claro para que la función resultante de la geometría garantice esfuerzos a compresión en todos los elementos que la constituyen.

Es necesario considerar la expansión térmica del material en las conexiones, para evitar que el sistema falle por los cambios de dimensiones que presente durante el día. Para la madera plástica

de PEAD reciclado de la empresa mexicana se consideran 5mm de juego entre las piezas, así los elementos que constituyen la estructura tienen el espacio suficiente para permitir el cambio de dimensiones. Siempre es necesario establecer los juegos de dimensiones de acuerdo a la temperatura del lugar donde se desee aplicar.

La madera plástica que se estudia en la presente investigación se puede aplicar con seguridad en elementos estructurales de arquitectura efímera, como lo son pabellones temporales de exposición. En este tipo de aplicaciones las reducciones de resistencia del material por tiempo de uso, es decir fluencia, disminuyen, ya que no es arquitectura permanente, por lo tanto se necesita menos cantidad de material para construir este tipo de objetos.

El uso intermitente del material en objetos arquitectónicos efímeros ayuda a que la madera plástica regrese a su forma original entre cada uso. El espacio de tiempo que debe existir para el re-uso de una pieza de madera plástica en otro objeto arquitectónico debe ser fijado la empresa que elabora el material.

Futuras investigaciones

Debido a que el comportamiento térmico de la MPPR de la empresa mexicana es estable se recomienda realizar pruebas mecánicas bajo el efecto de la temperatura para obtener un factor por temperatura menor al que se propone en esta investigación.

Utilizar el material para arquitectura efímera recurrentemente, es decir con más de un solo uso, requiere mayor investigación. Después de que la madera plástica ha sido utilizada para construir arquitectura efímera es posible que presente una deformación por la fatiga del esfuerzo que recibió el material. La deformación no impide la reutilización pero es importante dejar reposar el material para que regrese a su forma original. Futuras investigaciones deben definir el método adecuado que asegure encontrar el tiempo necesario de reposo de la madera plástica para reutilizarla en un nuevo objeto sin que pierda resistencia y considerando los factores que produjeron la deformación (temperatura y esfuerzos).

Rigidizar el material se convierte en una opción viable para generar un producto que aumente más sus aplicaciones. Con la presente investigación se confirma que la madera plástica se puede utilizar en sistemas que generen esfuerzos a compresión, pero si se rigidiza el material será una realidad la aplicación en sistemas que exijan resistencia a flexión.

El método de cálculo propuesto por la ASTM reduce la resistencia permisible de la madera plástica a la zona elástica de su comportamiento bajo cualquier esfuerzo, por lo tanto es una

resistencia baja. Se considera que puede permitirse más esfuerzo si se aplica un método de cálculo donde se considere el comportamiento viscoelástico del material, permitiendo mayor deformación de la madera plástica, ya que no provoca falla inmediata por la tenacidad que presenta. Si se utiliza dicho método es fundamental estudiar la deformación que puede presentar la madera plástica con el fin de compensar ese cambio de dimensiones en los elementos de la estructura proyectada, y con esta información definir el método para encontrar la dimensión que se debe compensar en el diseño de las piezas que integren la estructura que se proyecta.

El reglamento de construcciones del Distrito Federal no considera a la madera plástica como material estructural, sin embargo el artículo 157 deja abierta la posibilidad de integrarla mediante la comprobación analítica de su efectividad. Esta comprobación analítica no se establece en la presente investigación pero es el comienzo para que se realice con los datos encontrados.

La presente investigación contribuye a la integración de la madera plástica en las construcciones de México y a la expansión de aplicaciones que actualmente se le dan a dicho material. Información importante para cualquier arquitecto activo. Además se resalta la calidad de la madera plástica de PEAD reciclado que produce la empresa mexicana en comparación con la producida por las empresas líderes en el mercado (empresas estadounidenses). Con ello se pretende apoyar el uso de madera plástica nacional para disminuir la cantidad de residuos plásticos que aún permanecen en los vertederos de México.

La información obtenida por las pruebas y análisis que se realizaron en esta investigación apoya la producción de la madera plástica de PEAD reciclado para que siga el crecimiento de esta industria en México. También apoya la evolución del material para que se utilice en más aplicaciones que las actuales, las propuestas por esta investigación e incluso las aplicaciones que el arquitecto creativo establezca en lo sucesivo.

Bibliografía consultada

Recursos web

ADS Tigre. (2013). *ADS Tigre*. Recuperado el 25 de Octubre de 2013, de ADS Tigre Sitio web:

<http://www.tigre-ads.com/ads/index.php>

Berretta, H., Aguello, R., Gatani, M., & Gaggino, R. (2013). *Material de consulta*. Recuperado el 25 de Octubre de 2013, de Asociación Civil Argentina Pro Reciclado del PET Sitio web:

<http://www.arpet.org/docs/Nuevos-materiales-para-la-construccion-los-pasticos-recicladados-Conicet.pdf>

Buscador de arquitectura. (2011). *Arquitectura: 2011: ECOARK, edificio de 26 metros de alto hecho con botellas de plástico*. Recuperado el 25 de Octubre de 2013, de Buscador de arquitectura Sitio web:

<http://noticias.arq.com.mx/Detalles/12402.html#.UmsBlvnmNn0>

Buscador de arquitectura. (5 de Enero de 2012). *Sustentabilidad, Ecología y Bioclimática: Las Botellas de plástico PET dejarán de ser basura para convertirse en arquitectura*.

Recuperado el 25 de Octubre de 2013, de Buscador de arquitectura Sitio web:

<http://noticias.arq.com.mx/Detalles/12676.html#.Umr01PnmNn0>

Byfusión. (s.f.). *Byfusion Technology - the solution of plastic waste*. Recuperado el 25 de Octubre de 2013, de Byfusion Technology Sitio web:

<http://www.byfusion.net/>

Condo Ortiz, M. (2012). *Productos y servicios petroquímica PEMEX*. Recuperado el 2 de Noviembre de 2013, de Petroquímica PEMEX Sitio web:

<http://www.ptq.pemex.com/productosyservicios/eventosdescargas/Documents/Foro%20PEMEX%20Petroqu%C3%ADmica/2012/03%20Mercado%20pl%C3%A1sticos%202012.pdf>

Connect green. (2 de Octubre de 2010). *Recycling plastic bottles to build a home*. Recuperado el 25 de Octubre de 2013, de Connect green Sitio web:

<http://www.connect-green.com/tag/andreas-froese/>

Dávila, R. (21 de Noviembre de 2010). *Construyen paneles prefabricados con PET reciclado*.

Recuperado el 25 de Octubre de 2013, de JOURNALMEX Periodistas de México Sitio

web: <http://journalmex.wordpress.com/2010/11/21/construyen-paneles-prefabricados-con-pet-reciclado/>

Ecodintra. (2012). *Ficha técnica*. Recuperado el 25 de Octubre de 2013, de Ecodintra Sitio web:

<http://ecoreaccion.com/downloads.htm>

Efisa. (s.f.). *Efisa*. Recuperado el 12 de Noviembre de 2013, de Tanques de polietileno rotoplas:

<http://www.efisa.com.mx/productos/tanques/tanques-de-polietileno-rotoplas.html>

Emium. (2010). *Emium. Envase Modular Interconectable de Usos Múltiples*. Recuperado el 25 de Octubre de 2013, de Emium sitio web: <http://www.emium.com.ar/>

- Geotexan Geosintéticos de alta calidad.* (s.f.). Recuperado el 12 de Noviembre de 2013, de Inicio: http://www.geotexan.com/geomembranas_geotesan_pead.php
- Grupo Daissa. (s.f.). *Grupo Daissa.* Recuperado el 25 de Octubre de 2013, de Grupo Daissa Sitio web: <http://www.daissainnovations.com/index.php>
- Grupo Gysapol. (2014). *Grupo Gysapol.* Recuperado el 20 de Marzo de 2014, de Grupo Gysapol S.A. de C.V. sitio web: <http://www.gysapol.com/>
- Krishnaswamy, P., & Lampo, R. (2001). *Recycled-Plastic Lumber Standards.* Recuperado el 3 de Octubre de 2014, de ASTM: http://www.astm.org/SNEWS/DECEMBER_2001/wsd_dec01.html
- Kuadro. (s.f.). *Kuadro.* Recuperado el 13 de Enero de 2014, de Kuadro soluciones ecológicas: <http://www.kuadro.mx/>
- Lester, G. (2013). *History and Physical Chemistry of HDPE.* Recuperado el 9 de noviembre de 2013, de Plastics Pipe Institute Sitio web: http://plasticpipe.org/pdf/chapter-1_history_physical_chemistry_hdpe.pdf
- Numa industrial. (s.f.). *Numa industrial.* Recuperado el 28 de octubre de 2013, de Numa industrial Sitio web: <http://www.numaindustrial.com/>
- O Ecotextiles. (11 de Noviembre de 2012). *Beyond of natural fibers.* Recuperado el 31 de Octubre de 2013, de O Ecotextiles Sitio web: <http://oecotextiles.wordpress.com/category/fibers/synthetic/recycled-polyester-synthetic/>
- Organización de las Naciones Unidas. (3 y 14 de junio de 1992). *Organización de las Naciones Unidas.* Recuperado el 4 de Noviembre de 2013, de Programa 21: Capitulo 21: <http://www.un.org/spanish/esa/sustdev/agenda21/agenda21spchapter21.htm>
- SEMARNAT. (Abril de 2013). *Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).* Recuperado el 21 de Octubre de 2013, de Consulta temática: http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/approot/dgeia_mce/html/mce_index.html
- Tensile structure systems.* (s.f.). Recuperado el 12 de Noviembre de 2013, de Architectural membrane roofing: <http://www.tensilestructures.com/architectural-membrane-roofing.html>
- Vertech. (2013). *Vertech composites.* Recuperado el 25 de Octubre de 2013, de Vertech composites Sitio web: <http://verttechcomposites.co.uk/>
- Woodworker's Journal. (2002). *Haunched Mortise & Tenon.* Recuperado el 4 de Octubre de 2014, de Ron's Book Case Planning: http://www.ronbrown.50megs.com/panel_doors.htm

Normatividad

- ASTM International. (1998). *D 6341-98: 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)*. Pensilvania, USA: ASTM International.
- ASTM international. (2000). *D 5033-00: Standard Guide for Development of ASTM Standards Relating to Recycling and Use of Recycled Plastics*. Pensilvania, USA: ASTM international.
- ASTM International. (2001). *D 6662-01: Standard Specification for Polyolefin-Based Plastic Lumber Decking Boards*. Pensilvania, USA: ASTM International.
- ASTM International. (2003). *D 6108-03: Standard Test Method for Compressive Properties of Plastic Lumber and Shapes*. Pensilvania, USA: ASTM International.
- ASTM International. (2003). *D 6109-03: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced an Reinforced Plastic Lumber*. Pensilvania, USA: ASTM International.
- ASTM International. (2003). *D 6111-03: Standard Test Method for Bulk Density And Specific Gravity of Plastic Lumber and Shapes by Displacement*. Pensilvania, USA: ASTM Intenational.
- ASTM International. (2003). *D638-03: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. Pensilvania, USA: ASTM International.
- ASTM International. (2013). *D 7568-13: Standard Specification for Polyethylene-Based Structural-Grade Plastic Lumber for Outdoor Applications*. Pensilvania, USA: ASTM International.

Libros y artículos científicos

- Achereiner, F., Engelsing, K., Bastian, M., & Heidemeyer, P. (2013). Accelerated creep testing of polymers using the stepped isothermal method. *Polymer Testing*, 447-454.
- Askeland, D. R., Fulay, P. P., & Wright, W. J. (2012). *Ciencia e ingeniería de materiales*. Mexico, D.F.: CENGAGE Learning.
- Bozorg-Haddad, A., & Iskander, M. (2010). Comparison of Accelerated Compressive Creep Behavior of Virgin HDPE Using Thermal and Energy Approaches. *ASM International*, 1219–1229.
- Bozorg-Haddad, A., Iskander, M., & Chen, Y. (2012). Compressive strength and creep of recycled HDPE used to manufacture. *Construction and building materials*, 505-515.
- Breslin, V. T., Senturk, U., & C. Berndt, C. (1998). Long-term engineering properties of recycled plastic lumber used in pier construction. *Resources, Conservation and Recycling*, 243–258.
- Cabildo Miranda, M., Claramunt Vallespí, R., Cornago Ramírez, M., Escolástico León, C., Esteban Santos, S., Farrán Morales, M., . . . Sanz del Castillo, D. (2008). *Reciclado y tratamiento de residuos*. Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia.

- Colomer Mendoza, F., & Gallardo Izquierdo, A. (2010). *Tratamiento y gestión de residuos sólidos*. Méxco, D. F.: Limusa.
- Elleuch, R., & Taktak, W. (2005). Viscoelastic Behavior of HDPE Polymer using Tensile and Compressive Loading. *ASM International*, 111-116.
- Environment and Plastics Industry Council (EPIC), Corporartions Supporting Recycling (CSR). (2003). *Recycled Plastic Lumber*. Toronto.
- Eyssautier de la Mora, M. (2006). *Metodología de la investigación. Desarrollo de la inteligencia*. México, D. F.: Cengage Learning.
- G. Lampo, R., & J. Nosker, T. (1997). *Development and Testing of Plastic Lumber Materials for Construction Applications*. New Brunswick: US Army Corps of Engineering: Construction Engineering Research Laboratories.
- Gómez Antón, M., & Gil Bercero, J. (1997). *Los plásticos y el tratamiento de sus residuos*. Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- Goodship, V. (2007). *Introduction to plastics recycling*. Reino Unido: Rapra Technology Limited.
- Hernández Luna, H., Martínez Reyes, V., Arrazola Domínguez, F., Moreya Mercado, J., & Hernández Garrido, S. (2010). *Transformación y reciclado de polímeros*. México, D.F.: Instituto Politécnico Nacional SEP.
- K. A. Gopu, V., & K. Seals, R. (s.f.). *Relationship of Recycled Plastic Lumber Mechanical Propierties and Design Considerations*. Baton Rouge: Department of Civil and Environmental Engineering, Louisiana State University.
- Larsen, B. (2007). *State of the Recycled Plastic Lumber Industry*. Worthington: PLTA.
- Makowski, Z. (1972). *Estructuras Espaciales de Acero*. Barcelona: Gustavo Gili.
- Mariscal Mariscal, J. M. (2009). *Resistencia de 4 ensambles utilizados en la construcción de muebles de madera, Tesis de Licenciatura*. Texcoco, Edo. de México: Universidad de Autónoma Chapingo.
- McLaren Engineering Group. (2003). World's first recycled plastic bridge. *Use of plastic composite materials in bridge construction and transportation* (págs. 25-62). New Baltimore, NY: Rutgers University.
- Morales Méndez, J. (2010). *Introducción a la ciencia y tecnología de los plásticos*. México, D. F.: Editorial Trillas.
- Nosker, T., & Renfree, R. (2000). *Recycled plastic lumber: from park benches to bridges*. Piscataway.
- Parker, H. (1992). *Diseño simplificado de estructuras de madera*. Ciudad de México: Limusa.
- Platt, B., Lent, T., & Walsh, B. (2005). *Guide to Plastic Lumber*. Washington: The Healthy Building Network.
- Quarmby, A. (1976). *Materiales plásticos y arquitectura experimental*. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, S. A.

- R. Carroll, D., B. Stone, R., M. Sirignano, A., M. Saindon, R., C. Gose, S., & A. Friedman, M. (2003). Structural properties of recycled hdpe plastic lumber decking planks. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*(52:8), 709-724.
- Reis, J., Pacheco, L., & da Costa Mattos, H. (2013). Influence of the temperature and strain rate on the tensile behavior of post-consumer recycled high-density polyethylene. *Polymer testing*, 1576–1581.
- Reis, J., Pacheco, L., & da Costa Mattos, H. (2014). Temperature and variable strain rate sensitivity in recycled HDPE. *Polymer Testing*, 30-35.
- Reyes Vigil Montaña, M., Pastoriza Martínez, A., & Fernández de Piérola, I. (2002). *Los plásticos como materiales de construcción*. Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- Rubin, I. (2008). *Materiales plásticos, propiedades y aplicaciones*. México, D. F.: Editorial Limusa.
- Saavedra R., M. (2001). *Elaboración de tesis profesionales*. México: Editorial Pax México.
- Schwane, E. (2007). *Plásticos reciclados para la construcción. Potenciales para el reciclaje de los desechos plásticos bajo criterios sustentables en México, Tesis de maestría*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Smith, F. (1993). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de los materiales*. España: McGraw Hill.
- Torroja Miret, E. (2007). *Razón y ser de los tipos estructurales*. España: Colegio de ingenieros de caminos, canales y puertos.
- W. T., M., & H. M., N. (1977). *Estructuras*. Ciudad de México: Representaciones y servicios de ingeniería S. A.

Gráficas

Gráfica 1: Generación nacional de residuos sólidos urbanos (RSU) (SEMARNAT, 2013).....	5
Gráfica 2: Residuos sólidos urbanos por tipo 2012 (SEMARNAT, 2013)	6
Gráfica 3: Temperatura de transición vítrea y de fusión en los termoplásticos Elaboración propia con datos de (Smith, 1993, pág. 419)	25
Gráfica 4: Cristalinidad y peso molecular de los distintos tipos de PE Elaboración propia con datos de (Reyes Vigil Montaña, et. al., 2002, pág. 110)	27
Gráfica 5: Esfuerzo deformación PEAD y PEBD	29
Gráfica 6: Gráfica esfuerzo-deformación compresión.....	55
Gráfica 7: Gráfica esfuerzo-deformación tensión.....	60
Gráfica 8: Gráfica esfuerzo-deformación flexión.....	68
Gráfica 9: Esfuerzo deformación compresión y grado estructural.....	77
Gráfica 10: Comparativa con la madera natural.....	78
Gráfica 11: Esfuerzo-deformación axial.....	79
Gráfica 12: Comparativa mínimos por las normas y promedio flexión	80
Gráfica 13: Variación de dimensiones por temperatura de varios materiales.....	80
Gráfica 14: Compresión estimada a diferentes temperaturas	90
Gráfica 15: Factor de temperatura	91
Gráfica 16: Esfuerzos a diferentes velocidades	92
Gráfica 17: SED vs Deformación resultantes	94
Gráfica 18: m vs deformación	95
Gráfica 19: Esfuerzo-deformación estimada a 10 años	96
Gráfica 20: Esfuerzo-tiempo para los dos ensayos.....	97

Ilustraciones

Ilustración 1: Jerarquía del tratamiento de residuos propuesta por la UE Elaboración propia con datos de (Cabildo Miranda, et al., 2008, p. 36)	8
Ilustración 2: Opción de manejo de los residuos plásticos Elaboración propia con datos de (Cabildo Miranda, et al., 2008, p. 299)	9
Ilustración 3: Fachada del EcoArk Pavilion (Buscador de arquitectura, 2011).....	11
Ilustración 4: Tabique de plástico reciclado (Schwanse, 2007).....	14
Ilustración 5: Sistema constructivo Kuadro (Kuardo, s.f.)	15
Ilustración 6: Puente hecho a base de PEAD reciclado en proceso de construcción (Vertech, 2013)	16
Ilustración 7: Madera plástica. (Grupo Gysapol, 2014)	21
Ilustración 8: Sección de madera plástica con mezcla de varios polímeros (G. Lampo & J. Nosker, 1997, pág. 34)	22
Ilustración 9: Formula química del PEAD.....	24
Ilustración 10: Estructura molecular de algunos polímeros (Smith, 1993, pág. 420)	27
Ilustración 11: Juego de bancas y mesa para playa Fuente: Catalogo “Imagenia” de bancas.....	38
Ilustración 12: Detalle de uniones en la cubierta de un mirador (G. Lampo & J. Nosker, 1997, pág. 76)	44
Ilustración 13: Puente fabricado con madera plástica reforzada.....	45
Ilustración 14: Detalle de placa con varilla	46
Ilustración 15: Detalle de vigas principales (McLaren Engineering Group, 2003, pág. 61).....	46
Ilustración 16: Puente peatonal (G. Lampo & J. Nosker, 1997, pág. 67)	47
Ilustración 17: Deformación de la probeta 4.....	55
Ilustración 18: Tipo de falla por compresión (Norma ASTM D6108-03, pag. 4).....	56
Ilustración 19: Probeta Tipo III para tensión (ASTM International, 2003, pág. 4).....	57
Ilustración 20: Probeta número 3 ensayada.....	58
Ilustración 21: Fractura de las probetas	61
Ilustración 22: Imperfecciones de la madera plástica ensayada	61
Ilustración 23: Disposición del equipo para la prueba de flexión.....	63
Ilustración 24: Disposición del equipo con soportes articulados	66
Ilustración 25: Deflexión de la viga con soportes articulados	67
Ilustración 26: Probeta flexionada al máximo permitido por el equipo.....	67
Ilustración 27: Línea de referencia para mediciones.....	70
Ilustración 28: Enfriamiento del anticongelante	71
Ilustración 29: Equipo para la prueba a alta temperatura	72
Ilustración 30: Caja de acrílico con focos en funcionamiento	72
Ilustración 31: Perspectivas	83
Ilustración 32: Trazo del arco funicular con claro de 2.8m	84
Ilustración 33: Trazo del arco funicular con claro de 13m	84

Ilustración 34: Vista frontal de la cubierta propuesta	85
Ilustración 35: Vista lateral de la cubierta propuesta.....	86
Ilustración 36: Detalle de conexiones. Vista Frontal.	86
Ilustración 37: Detalle de conexiones. Vista isométrico.....	86
Ilustración 38: Detalle de conexión entre arco secundario y principal. Vista isométrico.	87
Ilustración 39: Detalle de base metálica de la estructura	87
Ilustración 40: Perspectiva (izquierda), Planta (derecha).....	101
Ilustración 41: Alzado frontal (izquierda), Alzado lateral (derecha).....	101

Tablas

Tabla 1: Identificación de polimeros Elaboración propia con datos de (O Ecotextiles, 2012)	10
Tabla 2: Datos obtenidos en los diferentes procedimientos de gestión Elaboración propia con datos de (Gómez Antón & Gil Bercero, 1997, pág. 336).....	19
Tabla 3: Propiedades de los plásticos más comunes. Elaboración propia con datos de (Gómez Antón & Gil Bercero, 1997, pág. 64)	29
Tabla 4: Algunos procedimientos de soldaduras de plásticos (Gómez Antón & Gil Bercero, 1997, pág. 150)	35
Tabla 5: Comparativa de cuatro diferentes marcas de MPPR (parte 1) Recopilación de varias fuentes, ver anexo.	36
Tabla 6: Comparativa de seis diferentes marcas de MPPR (parte 2) Recopilación varias fuentes, ver anexo.....	36
Tabla 7: Resumen de resultados Elaboración propia con datos de (R. Carroll, et al., 2003)	41
Tabla 8: Dimensiones de las probetas	51
Tabla 9: Resultados de la prueba de compresión.....	54
Tabla 10: Resultados de la prueba de tensión.....	59
Tabla 11: Resultados de la prueba de flexión.....	66
Tabla 12: Resultados por probeta.....	74
Tabla 13: Coeficiente de expansión térmica lineal resultante	74
Tabla 14: Resultados de la prueba.....	76
Tabla 15: Propiedades mecánicas de la MPPR de la empresa mexicana	81
Tabla 16: Resultados de la ecuación.....	93
Tabla 17: Análisis de cargas	100
Tabla 18: Cargas y deflexiones que actúan sobre los elementos críticos	102