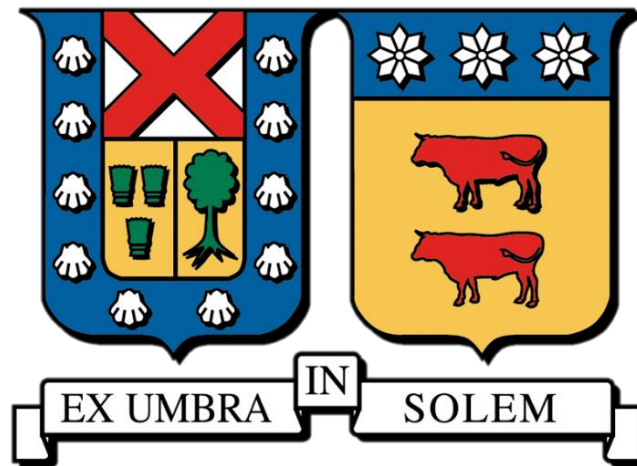


**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**

**DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES**

**VALPARAÍSO - CHILE**



**“CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA  
MADERA PLÁSTICA”**

Memoria de titulación presentada por  
MATÍAS EDUARDO MORALES PAVEZ

Como requisito parcial para optar al título de  
Constructor Civil

Profesor Guía  
SERGIO CARMONA MALATESTA

JULIO 2024

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco el apoyo de mi familia, padre, madre y hermanos; también a mis grandes amigos y por supuesto a mi pareja, que lleva a superarme día a día.

## RESUMEN

El origen de la materia prima de la madera plástica, el plástico, proviene de una fuente agotable de recursos, el que actualmente está siendo depositado en vertederos debido a que tiene una reducida degradabilidad, bajo reciclaje y está provocando un serio problema de contaminación.

La madera plástica es una buena alternativa constructiva, por su procedencia, usos y características que ofrece. Su fabricación comienza con la obtención de plásticos desechados y en desuso, los cuales se seleccionan, lavan, chipean y extrusan para obtener piezas de plástico con dimensiones de madera tradicional.

El material será sometido a distintos ensayos para determinar su comportamiento mecánico, bajo normas chilenas, la cual también permitirá comparar los resultados con las características físicas y mecánicas de la madera natural. Los ensayos corresponden a las compresiones paralela y perpendicular a las fibras, además ensayo cizalle (corte) y flexotracción.

En virtud de los estudios, se logró determinar que la madera plástica cuenta con aceptables cualidades en esfuerzos de compresión y corte en comparación con la madera natural, y una inferior resistencia en el comportamiento a flexión siguiendo con la misma comparación. Por lo que prestaría buenas funcionalidades a aprovechar en su sentido más rígido.

## ABSTRACT

The origin of the raw material of wood plastic, plastic, comes from an exhaustible source of resources, which is currently being deposited in landfills because it has a reduced degradability, low recycling and is causing a serious pollution problem.

Plastic wood is a good constructive alternative, due to its origin, uses and characteristics. Its manufacture begins by obtaining discarded and unused plastics, which are selected, washed, chipped and extruded to obtain plastic pieces with the dimensions of traditional wood.

The material will be subjected to different tests to determine its mechanical behavior, under Chilean standards, which will also allow comparing the results with the physical and mechanical characteristics of natural wood. The tests correspond to compressions parallel and perpendicular to the fibers, as well as shear and flexural tests.

By virtue of the studies, it was determined that plastic wood has good qualities in compression and shear stresses, and low resistance in flexural behavior. Therefore, it would provide good functionalities to be used in its more rigid sense.

## GLOSARIO

- **ANISOTROPÍA:** Dicho de una sustancia o de un cuerpo: Que posee propiedades distintas según la dirección en que se mide.
- **DUCTILIDAD:** Que permite deformaciones plásticas en frío sin llegar a romperse.
- **ECONOMÍA CIRCULAR:** modelo de producción y consumo que implica compartir, alquilar, reutilizar, reparar, renovar y reciclar materiales y productos existentes todas las veces que sea posible para crear un valor añadido. De esta forma, el ciclo de vida de los productos se extiende.
- **EXTRUSIÓN:** Dar forma a una masa metálica, plástica, etc. haciéndola salir por una abertura (o matriz) especialmente dispuesta, a través de esfuerzos de presión.
- **LÍMITE DE PROPORCIONALIDAD:** Límite del gráfico carga-deformación en la cual la curva se desvía de la recta inicial.
- **MÓDULO DE ELASTICIDAD:** Constante elástica que refleja la medida de la resistencia a la deformación axial. Se determina como la pendiente de la zona lineal del gráfico carga-deformación por debajo del límite de proporcionalidad.
- **NCH:** Norma Chilena.
- **SOSTENIBILIDAD/SUSTENTABILIDAD:** Especialmente en ecología y economía, que se puede mantener durante largo tiempo sin agotar los recursos o causar grave daño al medio ambiente.
- **TENSIÓN MÁXIMA O DE ROTURA:** Carga máxima por unidad de superficie soportada por la probeta cuando se aplica una carga de tracción o compresión a las fibras del material.

## Contenido

AGRADECIMIENTOS.....	2
RESUMEN .....	3
ABSTRACT .....	4
GLOSARIO.....	5
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	8
ÍNDICE DE ECUACIONES .....	10
<b>1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>11</b>
1.1 Antecedentes .....	11
1.2 Objetivos .....	12
1.3 Metodología .....	12
<b>2 MATERIA PRIMA, EL PLÁSTICO .....</b>	<b>13</b>
2.1 Polímeros termoplásticos utilizados para la fabricación de madera plástica .....	14
2.2 Reciclaje y beneficios .....	15
2.3 Reciclaje en Chile .....	16
<b>3 MADERA PLÁSTICA .....</b>	<b>18</b>
3.1 Obtención de la materia prima.....	19
3.2 Proceso de fabricación de la madera plástica .....	20
a) Limpieza .....	20
b) Trituración .....	21
c) Secado.....	21
d) Acopio .....	22
e) Extrusión.....	23
f) Enfriado y bodega.....	24
3.3 Tiempo de fabricación de madera plástica.....	24
3.4 Maquinarias utilizadas .....	25
3.5 Dimensiones de la madera plástica.....	26
3.6 Propiedades de la materia prima y de la madera plástica .....	27
<b>4 PROCEDIMIENTOS DE ENSAYOS .....</b>	<b>30</b>
Muestreo y su correlación.....	30
Ensayos para determinar propiedades mecánicas NCh .....	31
4.1 Resistencia a la compresión paralela .....	31

4.2 Resistencia a la compresión perpendicular .....	34
4.3 Resistencia cizalle paralelo a las fibras.....	36
4.4 Resistencia a la flexión estática .....	38
<b>5 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>42</b>
Densidad .....	42
Resultados de ensayos mecánicos.....	42
5.1 Resistencia a la compresión paralela .....	42
5.2 Resistencia a la compresión perpendicular .....	45
5.3 Resistencia cizalle paralelo a las fibras.....	47
5.4 Resistencia a la flexión estática .....	48
<b>6 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>49</b>
<b>7 CONCLUSIONES .....</b>	<b>52</b>
<b>8 BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>54</b>
<b>9 ANEXOS.....</b>	<b>56</b>

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Códigos de identificación de plásticos Fuente: (Thiers Montandon, 2016, pág. 17).....	13
Ilustración 2: Madera plástica pigmentada. Fuente: Fotografía propia capturada en empresa EverGood. Santiago, Chile. ....	19
Ilustración 3: Acopio de material. Fuente: Fotografía propia capturada en galpón de EverGood. Santiago, Chile. ....	20
Ilustración 4: Material plástico triturado. Fuente: fotografía propia en instalaciones empresa EverGood. Santiago, Chile. ....	21
Ilustración 5: Acopio de material Fuente: fotografía propia desde instalaciones empresa EverGood. Santiago, Chile. ....	22
Ilustración 6: Acopio de madera plástica Fuente: fotografía propia en empresa TimberEcco. Santiago, Chile. ....	24
Ilustración 7: Extrusora. Fuente: Página web (XXI, 2022). ....	25
Ilustración 8: Husillo extrusor. Fuente: Página web (XXI, 2022). ....	26
Ilustración 9: Formato de venta madera plástica Fuente: Página web de Evergood. (EVERGOOD, 2023) .....	27
Ilustración 10: Trozos de madera plástica Fuente: fotografía propia en laboratorio LEMCO. Valparaíso, Chile. ....	28
Ilustración 11: Probeta ensayo compresión paralela a la fibra, pieza de 50 mm • 50 mm • 200 mm Fuente: imagen extraída de Norma Chilena de Calidad Nch 973. Medidas en milímetros. ....	32
Ilustración 12: Fallas a compresión paralela a la dirección de las fibras. Fuente: Fotografía de revista técnica (Salazar, Quintero, & Fonthal, 2016) .....	34
Ilustración 13: Probeta compresión perpendicular a la fibra, pieza de 50 mm • 50 mm • 150 mm. Fuente: imagen extraída de Norma Chilena de Calidad Nch 974. Dimensiones en milímetros. ....	35
Ilustración 14: Probeta ensayo corte a la fibra, pieza de 50 mm • 50 mm • 65 mm. Fuente: imagen extraída de Norma Chilena de Calidad Nch 976. Dimensiones en milímetros. ....	37

Ilustración 15: Poros en madera plástica Fuente: fotografía propia de maderas Evergood en laboratorio LEMCO.....	39
Ilustración 16: Ensayo a flexión estática Fuente: imagen extraída de Nch 987. Dimensiones en milímetros. ....	40
Ilustración 17: Falla a flexión. Fuente: Elaboración propia. ....	42
Ilustración 18: Gráfico compresión paralela. Fuente: Elaboración propia con datos recolectados en laboratorio LEMCO.....	44
Ilustración 19: Compresión perpendicular. Fuente: Elaboración propia con datos recolectados en laboratorio LEMCO.....	47
Ilustración 20: Gráfico carga versus deformación. Fuente: Libro de Mecánica de materiales Biblioteca USM (Beer, 2015).....	49
Ilustración 21: Gráfico carga versus deformación en madera plástica. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos en laboratorio LEMCO. Valparaíso, Chile. ....	50
Ilustración 22: Ensayo compresión paralela. Fuente: fotografía propia en laboratorio LEMCO. Valparaíso, Chile. ....	56
Ilustración 23: Ensayo cizalle. Fuente: fotografía propia en laboratorio LEMCO. Valparaíso, Chile. ....	56
Ilustración 24: Ensayo flexo-tracción. Fuente: fotografía propia en laboratorio LEMCO. Valparaíso, Chile. ....	57
Ilustración 25: Husillo extrusores. Fuente: fotografía propia en empresa que fabrica hilos extrusores. Santiago, Chile. ....	57
Ilustración 26: Falla al corte. Fuente: fotografía propia en laboratorio LEMCO. Valparaíso, Chile .....	58

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Tensión de compresión paralela en el límite de proporcionalidad .....	33
Ecuación 2: Tensión máxima o de rotura compresión paralela.....	33
Ecuación 3: Módulo de elasticidad compresión paralela .....	33
Ecuación 4: Tensión unitaria de compresión perpendicular.....	36
Ecuación 5: Tensión máxima o de rotura de compresión.....	36
Ecuación 6: Módulo de elasticidad por compresión perpendicular.....	36
Ecuación 7: Esfuerzo de corte máximo .....	38
Ecuación 8: Tensión unitaria de flexión en el límite de proporcionalidad.....	41
Ecuación 9: Módulo de rotura a la flexión .....	41
Ecuación 10: Módulo de elasticidad a la flexión.....	41

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Antecedentes

La madera plástica es un material que se obtiene de distintos tipos de polímeros reciclados, donde en Chile se compone en su mayoría de polipropileno y polietileno. La mezcla de este material reciclado, con etapas de limpieza, selección y triturado, se procesa a temperatura para luego ser extrusada en moldes de acero y así obtener un material doblemente ecológico, que reemplaza a la madera natural y que su materia prima es nuestra basura del día a día, atacando directamente la preocupación ambiental.

La búsqueda de nuevos materiales ecológicos que presten soluciones constructivas logró que actualmente, en Chile, diferentes empresas están comercializando elementos para la construcción tales como tablas, cuarterones, pisos para terrazas, entre otros de este material reciclado; sin embargo, no se ha realizado una caracterización mecánica de sus propiedades que permita optimizar sus aplicaciones. A través de esta memoria y con apoyo de cinco empresas nacionales, se propone realizar una extensa caracterización de las propiedades mecánicas de los diferentes tipos de madera plástica disponibles.

Esta caracterización de propiedades se realizó a través de ensayos de compresión, tracción, flexión y cizalle, utilizando los ensayos establecidos en la normativa chilena para la madera tradicional. Los resultados obtenidos, se compararon con las propiedades de la madera tradicional disponible en la literatura.

## 1.2 Objetivos

### Objetivos generales

- Caracterizar las propiedades mecánicas de la madera plástica disponible en el mercado nacional.

### Objetivos específicos

- Adaptar los ensayos para caracterizar propiedades de la madera tradicional a su uso con probetas de madera plásticas.
- Determinar el módulo de elasticidad, límite de proporcionalidad, resistencia máxima y deformación en rotura de probetas de madera plástica ensayada a compresión, flexión, tracción y cizalle.
- Comparar las propiedades mecánicas de la madera plástica con la de la madera tradicional.

## 1.3 Metodología

La madera plástica recolectada de estudiará en el laboratorio LEMCO de la Universidad Federico Santa María llevándose a cabo mediante las instrucciones dispuestas en la Norma Chilena de Calidad correspondiente a cada ensayo a utilizar.

La primera etapa es elaborar las distintas probetas con la correlación correspondiente para sus tamaños, destacando en este punto que cada madera plástica es distinta por su fabricación y, por ende, distinta calidad en su conformación y comportamiento.

La segunda etapa es ensayar todas las probetas fabricadas con el objetivo de caracterizar mecánicamente el material, además de observar su comportamiento de esfuerzos internos y sus deformaciones.

Finalmente, los datos serán recopilados y analizados por comparación tanto entre maderas plásticas, como con la madera natural ampliamente utilizada en Chile, para así obtener conclusiones.

## 2 MATERIA PRIMA, EL PLÁSTICO

Los polímeros son una sustancia química de carácter sintético que proviene del petróleo, el cual posee muchas características que lo convierten en un material diverso y masivo en todo el mundo.

Dada su composición química, es posible identificarlo como un polímero unido por distintos enlaces, identificando dos familias: los termoplásticos y los termorígidos, los primeros logran fundirse, mientras que los termo rígidos, conservan su forma hasta ser quemados. Dependiendo de la estructura química, se divide en 7 categorías, las que se puede apreciar en la siguiente ilustración:

Símbolo	Tipo Plástico	Propiedades	Usos
 PET	Tereftalato de Polietileno (Polyethylene Terephthalate)	Resistencia física, propiedades térmicas, propiedades barreras, ligereza, resistencia química.	Bebidas, refrescos y agua, envases para alimentos.
 HDPE	Polietileno de Alta Densidad (High Density Polyethylene)	Poco flexible, resistencia a agentes químicos, opaco, moldeable y de fácil pigmentación. Se suaviza a los 75°C.	Bolsas de supermercado, bolsas para congelados, envases de leche, helados, jugos, químicos, detergentes, etc.
 PVC	Policloruro de Vinilo (Polyvinyl chloride)	Duro y resistente, elástico, de color claro. Se suaviza a los 80°C.	Tuberías, desagüers, mangueras, cables, etc.
 LDPE	Polietileno de Baja Densidad (Low Density Polyethylene)	Suave y flexible, traslúcido. Se suaviza a los 70°C.	Bolsas para residuos, envases, películas para empaqué.
 PP	Polipropileno (Polypropylene)	Menos flexible que los anteriores, traslucido, soporta solventes, amplia versatilidad. Se suaviza a los 140°C.	Envases de alimentos, artículos de bazar y menaje, bombillas, equipos de jardinería, etc.
 PS	Poliestireno (Polystyrene)	Rígido, se rompe con facilidad, se ve afectado por grasas y solventes. Se suaviza a los 95°C.	Envases para alimentos congelados, aislante para heladeras, cubiertos de plástico, imitaciones de cristal, juguetes, envases de cosméticos, etc.
 OTHER	Otros	Aquí se incluyen otras resinas y materiales. Sus propiedades son variables dependiendo de la combinación de materiales que lo compongan.	Electrónica, asas de recipientes, piezas para empaques, etc.

*Ilustración 1: Códigos de identificación de plásticos*

*Fuente: (Thiers Montandon, 2016, pág. 17)*

## 2.1 Polímeros termoplásticos utilizados para la fabricación de madera plástica

Las principales características de los plásticos que favorecen a la creación de la madera plástica es su alta durabilidad, la buena capacidad maleable al calor, flexibilidad, bajo costo de producción, capacidad aislante, no absorbe humedad, etc. permitiendo crear productos con un sinnfín de formas.

Todos los productos de madera plástica contienen mezclas de plásticos mayormente reciclados con numero identificador 1, 2, 4 y 5, donde respectivamente se describen:

Símbolo 1 (PET): “El Tereftalato de Polietileno es un plástico 100% reciclable que se usa principalmente en la fabricación de botellas. Cada año ingresan al país más de 55 mil toneladas de este material virgen y menos de un 15% vuelve a ser utilizado” (Maldonado Caballero, 2019). Este polímero es el más simple en su estructura química y también el más económico. Actualmente debido a su bajo reciclaje, es uno de los principales polímeros que dañan tanto al ser humano como al medio ambiente.

Símbolo 2 (HDPE): Polietileno de alta densidad se caracteriza por ser un producto más rígido que el PET, y también más seguro, ya que apenas desprende sustancias toxicas. Este material es el que le aporta densidad a la madera plástica.

Símbolo 4 (LDPE): Polietileno de baja densidad posee características que se pierden con el calor, es maleable y flexible.

Estos ingredientes, polietilenos, a la madera plástica le otorga ductilidad y flexibilidad, bajo punto de fusión y es el que más encontramos disponible en formato de reciclaje.

Símbolo 5 (PP): Polipropileno es uno de los materiales poliméricos más utilizados junto con el PET, con la diferencia que es más rígido y resistente, otorgándole a la madera plástica una favorable dureza y punto de fusión, pero cristalizándola, lo que, en una incorrecta proporción, la expondría a una falla frágil.

Símbolo 7 (Otros): Existen otros tipos de plásticos que no están en las categorías anteriores, y que debido al origen de los elementos que componen la madera plástica, el

reciclaje, es imposible contar con una separación absoluta de ellos, por lo que se considera la presencia de estos pequeños elementos, lo mismo ocurre con los plásticos no mencionados o con otros elementos, como lo puede ser el cobre y aluminio.

Debido a lo anterior, donde el material no proviene separado a exactitud, empresas se ven obligadas a realizar combinaciones con otros materiales, por ejemplo, cobre, aluminio, etc. Donde podemos comentar como ejemplo, que la empresa GoodWood de Puerto Montt utiliza “tetra-pack” en sus recetas para crear elementos de piezas plásticas dimensionadas (Urroz, 2023).

Las combinaciones de plásticos han puesto a prueba a las empresas con más trayectoria, ya que su camino no ha sido sólo de reciclar, sino de encontrar la “receta” más resistente y que ofrezca una madera plástica con mejores terminaciones y prestaciones. En conversaciones con distintas personas responsables de estas mezclas, se llegó a una aproximación de que la proporción de polietileno y polipropileno es de 7:3 aproximadamente para lograr obtener las mejores características de los tipos de mezclas de polímeros: ductilidad y rigidez. (Elliana, 2022)

## 2.2 Reciclaje y beneficios

Uno de los principales problemas ambientales que se tienen hoy es la contaminación provocada por el plástico. Desde los micro plásticos presentes en nuestra comida hasta las grandes toneladas de este material que terminan en vertederos o incinerados, son tema de discusión hace años en nuestro país y en el mundo, desde leyes aplicadas como la prohibición de bolsas plásticas de un solo uso, hasta más actuales como la ley REP (Responsabilidad extendida del Productor) se están haciendo cargo gradualmente de contrarrestar todo el daño hecho al medio ambiente en Chile.

El plástico está presente en todo tipo de productos y servicios, prestando muy buenas características como flexibilidad y rigidez, resistencia a químicos, y con un costo bajo de producción lo que nos lleva a la generación de 400 millones de toneladas de plástico cada año en el mundo y la mitad de esa producción está diseñada para usarse sólo una vez (Van

Der Meer, 2023). De todas esas toneladas creadas, la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico) destaca que del 15% del plástico recolectado para reciclar, un 40% de esos volúmenes en la práctica no acaban por esa vía y se eliminan como residuos, de tal forma que, el porcentaje reciclado real se limita a sólo un 9%. (EFE, 2022).

Este versátil material es tan masivo, que es una necesidad urgente de reciclarlo. Observando el contexto de la madera plástica se favorece desde dos grandes puntos de vista, el primero, es el auge que se le está dando al reciclaje del plástico, interés desde todas las entidades y personas, y por otro, la ayuda que le genera al medio ambiente, tanto por su conservación como por no seguir gastando recursos de energías no renovables.

### 2.3 Reciclaje en Chile

Son muchas las dificultades hoy en día en la industria del reciclaje: falta concientización en cómo se separan los residuos, herramientas que mejoren las conductas de la población, inversión en tecnología en procesos de separación y clasificación de los plásticos. etc. y la madera plástica tiene que lidiar con cada una de ellas.

Leyes y pactos hoy en día están marcando los pasos a seguir con la industria del reciclaje, como, por ejemplo: Ley de plásticos de un solo uso, Ley de responsabilidad extendida del productor (Ley REP), Ley de reciclaje, etc. en donde todas apuntan a obligaciones que se deberán tomar para darle fin a la disposición de plásticos en vertederos. La Ley Rep establece que los productores son responsables de la gestión de sus productos una vez que se conviertan en residuos (Fernández, 2023) lo que nos guiará a aumentar el reciclaje en Chile.

Por otro lado, han surgido nuevos conceptos a favor, por ejemplo “Diseño para el reciclaje” el cuál propone que el diseño original de un elemento plástico ya esté predispuesto para ser reutilizado sin un gasto de energía o para que permita un reciclaje fácilmente. Desde esta rama se puede desprender, además, “Economía Circular” que sienta sus bases en la no generación y reutilización de residuos, para el caso de la madera plástica aplica completamente, ya que, en su fabricación, toma los plásticos de diferentes formas y colores,

los lleva a la unión y formación de tablas y todo residuo o elemento que falló en su fabricación, tiene la posibilidad de repetir el proceso hasta lograr el producto final.

Beneficios del reciclaje: reducción de deforestación y utilización de energías no renovables, que conlleva con ello menores emisiones de monóxidos contaminantes, menor costo de recolección de plásticos que ya están clasificados, menor volumen de residuos ya que existiría una mejor reutilización del material, ayuda a la congestión de rellenos sanitarios, recuperación de valor y remuneración por venta de elementos reciclados, economía circular aprovechando la fabricación de este material.

Beneficios de la madera plástica: reutilización de gran cantidad y abarcando los distintos tipos de plástico, creación de elementos para la construcción con buenas prestaciones químicas y físicas, es un material sustentable y no genera huella de carbono.

### 3 MADERA PLÁSTICA

A nivel mundial la madera plástica se presenta de dos maneras: Wood Plastic Composite (WPC) y Plastic lumber (PL), donde el primero mencionado es una mezcla de plásticos reciclados con aserrín de madera, en proporciones 2:3 respectivamente, y en segundo lugar la madera con un 100% fabricadas con plástico reutilizado. (Thiers Montandon, 2016, pág. 22)

En Chile aparecen ideas de madera plástica en el año 2006, provenientes desde Alemania, en donde la Señorita Silvana Ellena, luego de culminar sus estudios de arquitectura en PUC, se encuentra con este material innovador y decide importar las ideas a Chile, logrando recién el 2011 una empresa con proceso productivo. (Thiers Montandon, 2016, pág. 23)

Un producto que en su fabricación la materia prima utilizada es un desecho, logra un elemento para la construcción ecológico, donde el formato de venta es similar al de la madera tradicional, de ahí proviene la denominación “madera plástica”.

Además de crear este nuevo material para la construcción, se aporta al medio ambiente reciclando el plástico desechado, desde bolsas, envases de todo tipo, todo producto que ya cumplió su fin o que desde su creación fueron descartados.

En Chile Timber Ecco, Revalora, EverGood, GoodWood y Maderas Río Verde componen el mercado actual de la madera plástica, cabe destacar que Timber Ecco es el iniciador en Chile con este material, mientras que los últimos nombrados son empresas conformadas en los últimos años.

El año recién pasado se dio a conocer este material, por ejemplo, logrando un espacio en un comercial de reconocida marca de comida, que su aporte consistía en instalar bancas de madera plástica en parques forestales de Chile, con los envases plásticos que fuesen reciclados de la marca, además municipalidades del sur de Chile están realizando alianzas con empresas creadoras de madera plástica para la construcción de muelles y pasarelas que están bajo la acción del clima (Evergood y GoodWood).

### 3.1 Obtención de la materia prima

La materia prima proviene de dos formas para la fabricación de madera plástica, la primera es que las empresas reciben los plásticos y toda la basura en bruto, donde ellos proceden con limpieza mecánica para obtener todos los “ingredientes” necesarios para su madera plástica, mientras que otras empresas dejan este proceso de separación a los centros de acopio, recibiendo el plástico tipo pellet listo para la fabricación de las piezas. Debido al poco auge del reciclaje y desarrollo de tecnología, ambos orígenes son costosos y difíciles de automatizar.

La madera plástica se fabrica principalmente de bolsas y envases, tanto reciclados o discontinuados directamente de las fábricas. El color de la madera plástica en bruto es café y negra, y así lo mantienen varias empresas, no importando la combinación de plásticos que se realicen y los colores propios que tengan. Un proceso para dar colores es agregar pigmentos específicos que dos empresas han ido desarrollando con el tiempo, los cuales dan distintas posibilidades que se pueden apreciar en la siguiente ilustración:



*Ilustración 2: Madera plástica pigmentada.*

*Fuente: Fotografía propia capturada en empresa EverGood. Santiago, Chile.*

### 3.2 Proceso de fabricación de la madera plástica

#### a) Limpieza

La materia prima procede de centros de acopio, puntos verdes y recolección propia que utilizan de distintos proveedores, en donde este material llega previamente seleccionado y en su mayoría limpios, y si estuviese muy contaminado, se vuelven a lavar dependiendo de las instalaciones y de la capacidad de las empresas de madera plástica, se preocupan de recibir un buen reciclaje para no gastar energías en espacios para separar y/o reparar el lavado. La siguiente ilustración muestra acopio de material plástico:



*Ilustración 3: Acopio de material.*

*Fuente: Fotografía propia capturada en galpón de EverGood. Santiago, Chile.*

Otros países emplean piscinas con químicos para lograr la separación de agentes externos al plástico por medio de decantación.

## b) Trituración

Luego de tener el material limpio, se procede a romper en pequeños pedazos por medio de chipeadora, que con hoja afiladas logra el tamaño adecuado para acopiarlo, además de homogenizarlo y dejarlo listo para el siguiente proceso. La siguiente ilustración muestra el material triturado:



*Ilustración 4: Material plástico triturado.*

*Fuente: fotografía propia en instalaciones empresa EverGood. Santiago, Chile.*

## c) Secado

El secado es al aire libre o ventiladores, donde se busca eliminar toda el agua y líquidos adheridos al plástico. Importante proceso ya que el agua genera poros dentro de la madera plástica afectando en su calidad.

d) Acopio

Material en partículas o chipeado, se guarda en grandes sacos para el siguiente proceso. El proceso de la madera plástica debe tener una logística adecuada respecto al chipeado y acopio, ya que el material en este estado ocupa un gran volumen, por otro lado, la línea de producción de momento en las empresas es muy difícil de variar por lo que, al estar generando un tamaño de piezas, o cambiar los moldes, los recolectores con el plástico no dejan de llegar. La siguiente ilustración muestra el material listo para los procesos siguientes:



*Ilustración 5: Acopio de material*

*Fuente: fotografía propia desde instalaciones empresa EverGood. Santiago, Chile.*

#### e) Extrusión

La extrusión es el proceso más importante de la madera plástica, donde mediante calor y esfuerzos internos se transforma el plástico sólido chipeado, en un “chorro” líquido de plástico a 200°C. Mediante extrusión se pueden crear infinitos elementos que dependen del molde y con las dimensiones que un matricero pueda lograr, siempre considerando la logística del desmolde. A parte de madera plástica que se fabrica en un molde recto, en otros países se están creando ladrillos huecos montables similares a un “lego”, por lo que el molde tiene otra lógica.

La extrusión es un proceso continuo, el receptáculo o tolva tiene que recibir constante carga de material, y apenas se logre el llenado completo del molde, se desacopla para atornillar el molde siguiente. Con esta característica se permite generar elementos de largas dimensiones, solo siendo el límite los elementos de perfiles de acero a utilizar para crear dichos moldes. Normalmente se utiliza más de un molde con una dimensión definida, para que el proceso sea continuo y por ende rápido, mientras se desmolda una tabla, ya se está rellenando otra matriz.

Dos fenómenos a mencionar que generan características en la madera plástica, la primera es que el molde se encuentra frío, por lo que el plástico líquido al entrar en contacto con él, se enfría a mayor velocidad en el centro de la pieza, creando la superficie externa de los elementos con una mayor dureza, y la segunda, el centro de las maderas quedan con poros de aire que no son eliminados por el tornillo extrusor, dando un centro con menos resistencia debido a la estructura, pero creando una capacidad de ductilidad a la madera.

Los desechos en la fabricación de los elementos plásticos o las maderas mal confeccionadas, ya sea por sus materiales o por no lograr temperaturas correctas, son nuevamente chipeados y vuelven nuevamente al proceso de extrusión. En la ilustración número 4, en el apartado de trituración, se puede observar trozos de madera plástica mezclados con plásticos reciclados listos para el nuevo proceso de extrusión.

#### f) Enfriado y bodega

Los moldes calientes recién rellenados, se sumergen en una tina de agua fría para acelerar el proceso de desmolde. Ya con el molde de acero frío, prosigue desmontarlo y dejar deslizar la pieza de plástico creado, listo para bodega.

Al momento de enfriar el molde, la pieza de madera plástica creada se contrae, lo que facilita el desmolde y no requiere uso de desmoldante, asimismo el molde de acero no queda con residuos. A continuación, una ilustración de maderas plásticas con distintas dimensiones:



*Ilustración 6: Acopio de madera plástica*

*Fuente: fotografía propia en empresa TimberEcco. Santiago, Chile.*

### 3.3 Tiempo de fabricación de madera plástica

El tiempo de fabricación depende de variables como: temperatura, velocidad de hilo, capacidad de máquina extrusora, sección a llenar y longitud del molde, materia prima, etc.

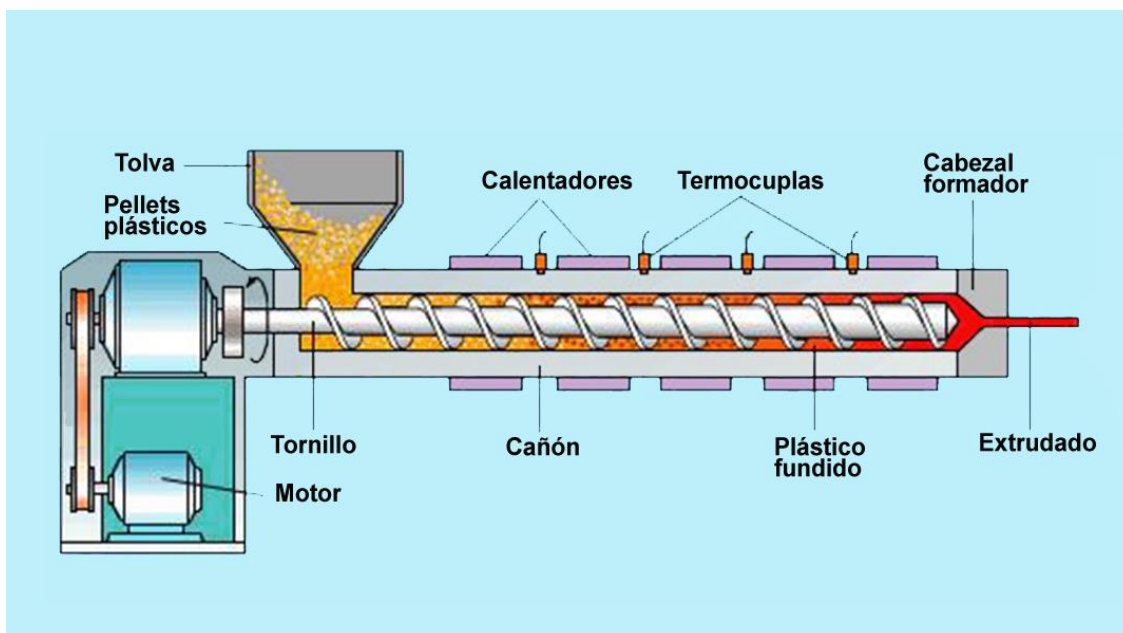
Existen toda una gama de tamaños de extrusoras, desde tamaño pequeño aproximadamente de 50 centímetros para crear filamentos de impresoras 3D hasta las

utilizadas en las empresas mencionadas que pueden llegar a tener hasta 4 o 5 metros de largo, las cuales trabajan 100 kilos de plástico por minuto. Una tabla contiene entre 10 y 30 kilos de plástico.

Las temperaturas de extrusión han sido ampliamente investigadas, y tienen un rango entre 200°C y 300°C en donde el principal factor es el tipo o mezcla de plástico a usar, demorándose desde segundos a un minuto el llenado de un molde para crear una pieza. Cada empresa tiene sus máquinas con diseño específicos, también la llegada de tipos de plásticos es muy variada dependiendo de la zona en que se encuentra, por esto es que los tiempos y calidades son propias de cada una de ellas.

### 3.4 Maquinarias utilizadas

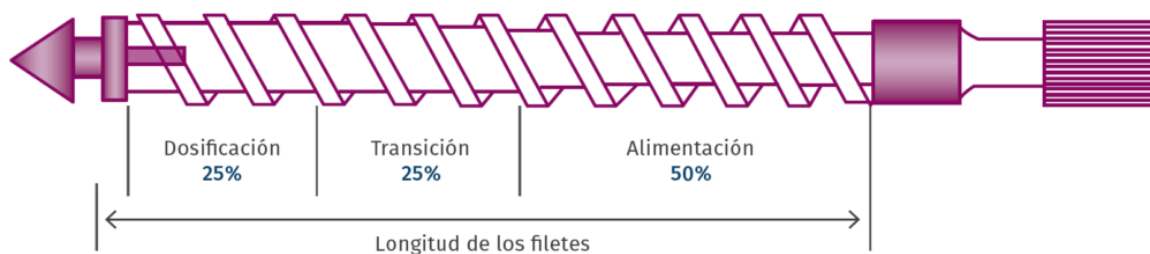
La creación de madera plástica es a través de la máquina extrusora, ella toma el plástico chipeado o peletizado en su tolva, lo derrite en su cámara a presión para luego ser inyectado al molde atornillado en su boquilla. La máquina extrusora y sus partes principales se pueden apreciar en la siguiente ilustración:



*Ilustración 7: Extrusora.*

*Fuente: Página web (XXI, 2022).*

Dentro de los elementos claves para la extrusión está el husillo y su camisa (tornillo y cañón), los cuales dependiendo del rendimiento y del plástico a procesar, se construyen a medida en acero inoxidable, con tolerancias pertinentes y es lo más costoso de la maquina extrusora. A continuación, se presenta un husillo extrusor con su tres principales zonas de trabajo:



*Ilustración 8: Husillo extrusor.*

*Fuente: Página web (XXI, 2022).*

Para el desarrollo del estudio, se utilizaron: Versa Tester, ingleteadora, sierra de banco y herramientas manuales, todas aportadas por laboratorio LEMCO.

### 3.5 Dimensiones de la madera plástica

Las dimensiones de la madera plástica fabricadas en Chile vienen establecidas por los perfiles de acero que se encuentran en el mercado, ya que se utilizan éstos para crearlas tablas. Por ejemplo, el perfil de acero de 75 mm cuadrado con 3 mm de espesor (75 mm • 75 mm • 3 mm), posee un lado interior de 69 mm, entonces luego de la extrusión de plástico, más el proceso de enfriado en agua fría que tiene la madera plástica, genera una contracción de la pieza a 62 mm • 62 mm, que es formato de venta de varias empresas. La siguiente imagen fue extraída del catálogo de maderas plásticas de la empresa Evergood:



**C6**  

---

**62 X 62MM**  

---

**2,85MTS - 1,85MTS**  
**9,7KGS - 6,3KGS**  

---

**TIPO DE PERFIL**  


*Ilustración 9: Formato de venta madera plástica*  
*Fuente: Página web de Evergood. (EVERGOOD, 2023)*

### 3.6 Propiedades de la materia prima y de la madera plástica

La densidad es una magnitud que se obtiene de la relación entre la masa y el volumen de un objeto, para el caso de esta investigación, se utilizará esta característica para determinar si existe alguna relación entre resistencia y densidad de la madera plástica con la madera natural.

La madera plástica posee una textura áspera por dos procesos, el primero es que el plástico es muy difícil de homogenizar por completo, debido a la mezcla de plásticos que se crea, y segundo, por el rápido enfriamiento al entrar en contacto con el molde lo que produce contracción del material, donde se puede observar en la siguiente fotografía:



*Ilustración 10: Trozos de madera plástica*

*Fuente: fotografía propia en laboratorio LEMCO. Valparaíso, Chile.*

Dentro de las propiedades físicas del material se pueden mencionar una alta durabilidad donde no le afectan elementos ácidos ni químicos, un material retardante a la llama, resistente a la intemperie y a la humedad debido a su impermeabilidad, no se astilla ni pierde su apariencia, no atrae termitas, microbios, bacterias resistiendo todo tipo de agente atmosférico. No le afectan los ambientes salinos, no se oxida y no requiere mantención.

Las propiedades mecánicas de la madera plástica fabricada en Chile no tienen precedentes, esta memoria abarca por primera vez esta característica y será a través de ensayos experimentales mecánicos los cuales están comprendidos en la norma chilena y son los aplicados para la madera natural.

Dentro de las propiedades mecánicas a determinar de la madera plástica se encuentran: resistencia a la compresión, corte y flexotracción.

## 4 PROCEDIMIENTOS DE ENSAYOS

### Muestreo y su correlación

El muestreo de madera plástica proviene de cinco empresas chilenas (Timber ecco, EverGood, GoodWood, Maderas Rio Verde, Revalora) cada una con su propia línea de producción y debido a ello, con comportamientos variables entre ellas.

La norma chilena establece las maderas deben estar libres de defectos y con un rango de contenido de humedad, que para el caso de estos ensayos no aplica, ya que la madera plástica no contiene estas fallas por su línea de producción continua, ni tampoco es factor su humedad.

Las probetas fueron seleccionadas a través de inspección visual presencialmente para el caso de las tres empresas ubicadas a las cercanías a Valparaíso (TimberEcco y EverGood en Santiago y GoodWood en Casablanca) y otras dos empresas enviaron sus muestras de retazos de madera que tenían en inventario.

Debido a que la madera plástica es creada mediante moldes de acero, ocurren dos situaciones para su ensayo: primero las dimensiones no son exactas debido a que corresponden a medidas del acero comercial, y segundo, no se pueden cortar las maderas plásticas en sentido longitudinal ya que su cara exterior aporta resistencia; por esto se tuvo que hacer una correlación de sus dimensiones para luego poder compararlas.

La correlación va a permitir realizar la comparación con la madera pino y obtener conclusiones acerca de posibles ventajas y/o desventajas, por otro lado, la comparación entre empresas de madera plástica demostrará si sus procesos productivos los llevan a un material constante y de calidad.

## Ensayos para determinar propiedades mecánicas NCh

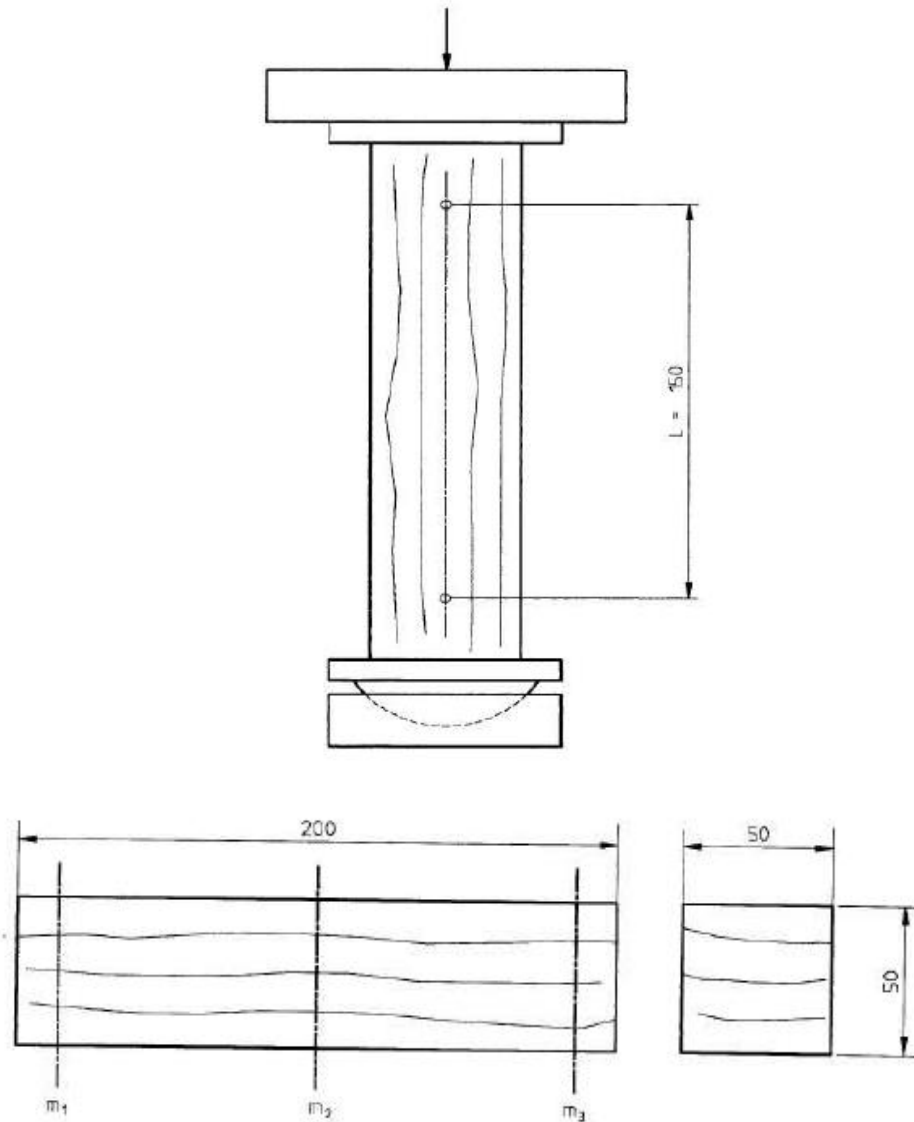
La “Madera plástica” es el material puesto en estudio compuesto 100% del reciclaje. Procedente desde dos fuentes principales, la primera netamente del reciclaje de la basura y la otra, de líneas de producción fallidas en fábricas (aquí la selección del plástico requiere menor gasto energético que en el primer caso). Este material será estudiado para determinar sus propiedades mecánicas y su proceso de fabricación.

Cabe destacar que la madera natural cuenta con defectos como nudos o inclinaciones de sus fibras, los que afectan directamente en su resistencia, en el caso de la madera plástica no ocurre ya que sus fibras son uniformes, a no ser que presente problemas en la fabricación, en donde un posible caso ocurre con una errónea velocidad de extrusión, logrando un centro de las piezas no uniformemente llena generando poros, los cuales son factor de disminución de resistencia de la madera, por otro lado, la falta de temperatura en el proceso de fabricación, no lograría una aleación correcta de los polímeros a unir.

### 4.1 Resistencia a la compresión paralela

NCh 973 (Instituto Nacional de Normalización , Nch 973: Madera - Determinación de las propiedades mecánicas - Ensayo de compresión paralela, 1986)

Las probetas del ensayo tienen una dimensión de 50 mm • 50 mm • 200 mm y su compresión se aplica a las caras opuestas radiales, la siguiente ilustración muestra las medidas y forma de la probeta de este ensayo:



*Ilustración 11: Probeta ensayo compresión paralela a la fibra, pieza de 50 mm • 50 mm • 200 mm*

*Fuente: imagen extraída de Norma Chilena de Calidad Nch 973. Medidas en milímetros.*

La probeta de madera plástica no posee las dimensiones transversales de 50 mm • 50 mm ya que su proceso de fabricación no permite con exactitud obtenerla, sólo una empresa me pudo facilitar esta dimensión y tuvieron que fabricar moldes especiales. Para el resto de los casos hubo que correlacionar las áreas, para poder comparar datos entre maderas plásticas y con la natural. Para el caso de los cortes de la probeta, se mantuvo la relación Ancho y Largo (1:4) como está descrita en la Norma Chilena, por lo que entre distintas empresas se obtuvieron probetas totalmente distintas en dimensiones.

Los cortes transversales fueron realizados por técnicos especializados de la Universidad, ya que se debe tener un corte recto, para que en el posterior ensayo a compresión no se mal distribuyan las cargas y se logre una deformación uniforme.

La probeta se centra en la maquina Versa Tester existente en laboratorio LEMCO, preocupándose de su posición totalmente vertical para recibir una carga continua con velocidad constante, tomando nota de forma manual la obtención de los resultados de deformación en milímetros y la carga aplicada a la probeta.

El ensayo a compresión termina cuando la probeta deja de soportar la carga y se ve gráficamente en la curva de resistencia.

De este ensayo se obtiene la carga máxima que resiste la madera plástica en la primera falla y se sacan conclusiones de cómo fue su falla y las características del material, el cual no es capaz de recuperar su forma inicial, quedando achatada en su centro.

Las tensiones a calcular son las siguientes:

Ecuación 1: Tensión de compresión paralela en el límite de proporcionalidad

$$f_{c,lp} = \frac{Plp}{a \cdot e}$$

Plp: Carga al límite de proporcionalidad.

a: Promedio de los anchos medidos.

e: Promedio de los espesores medidos.

Ecuación 2: Tensión máxima o de rotura compresión paralela

$$Rc = \frac{Q}{a \cdot e}, \text{ donde:}$$

Q: Carga máxima aplicada

Ecuación 3: Módulo de elasticidad compresión paralela

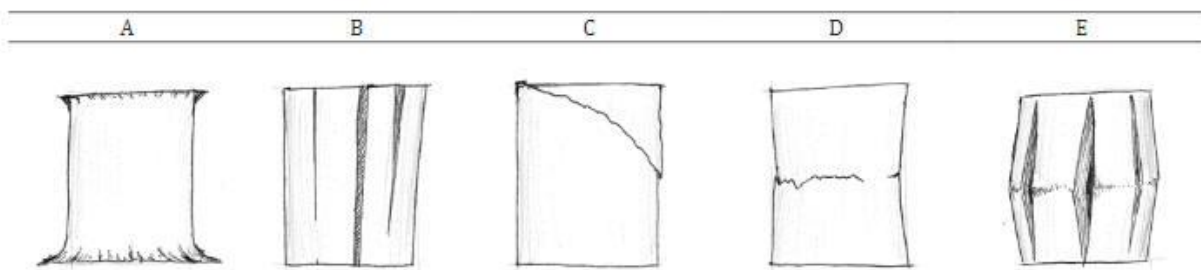
$$Ec = \frac{Plp \cdot L}{\sigma_{lp} \cdot a \cdot e}, \text{ donde:}$$

L: largo de probeta en el tramo central, donde ocurren las deformaciones 150 mm

$\sigma_{lp}$ : deformación en el límite de proporcionalidad

Donde además se dejarán plasmados las gráficas de carga versus deformación, donde se podrá observar el límite de proporcionalidad y el módulo de elasticidad.

Ilustración con los tipos de fallas en el ensayo a compresión paralela:



**Figura 5.** A) Falla por aplastamiento. B) Falla por tensión de las fibras. C) Falla por corte. D) Falla por pandeo general de las fibras en dirección interna E) Falla por pandeo general de las fibras en dirección externa.

*Ilustración 12: Fallas a compresión paralela a la dirección de las fibras.*

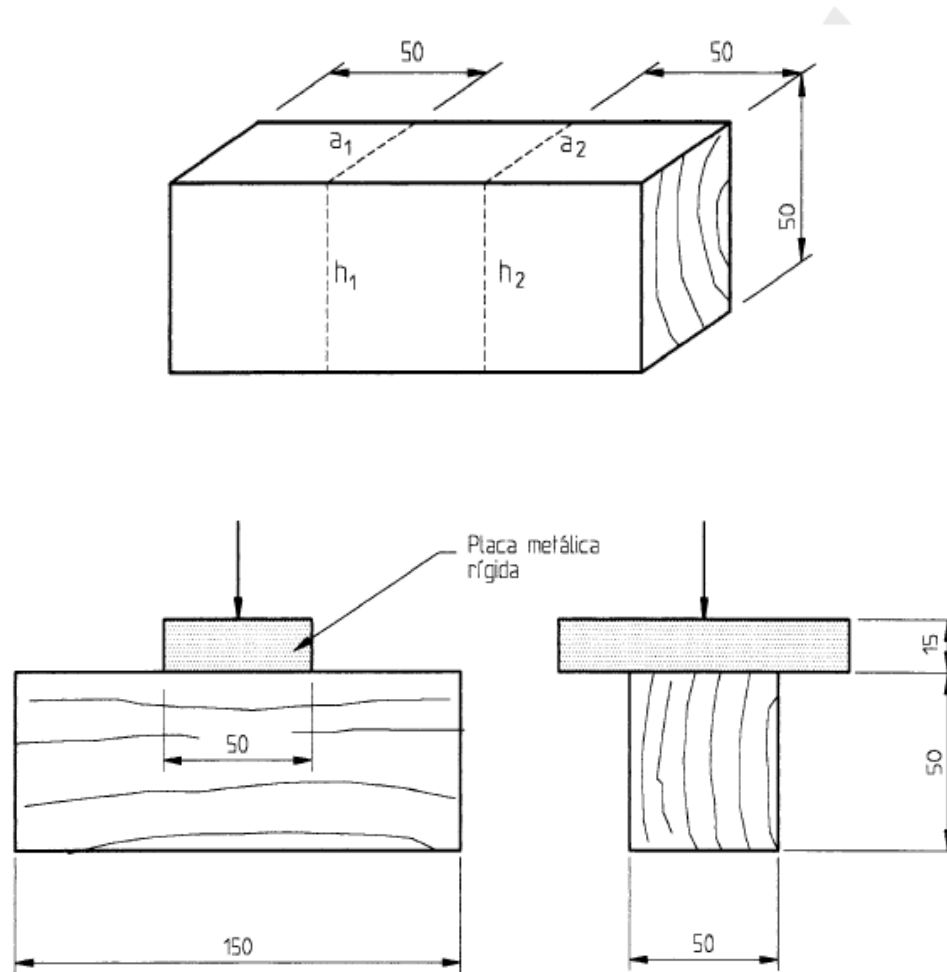
*Fuente: Fotografía de revista técnica (Salazar, Quintero, & Fonthal, 2016)*

En donde la falla visualmente encontrada es que se achata en su centro y los extremos conservan su área transversal, según infografía, falla E.

#### 4.2 Resistencia a la compresión perpendicular

Nch 974 (Instituto Nacional de Normalización, Nch 974: Madera - Determinación de las propiedades mecánicas - Ensayo a compresión perpendicular a las fibras, 1986)

Las probetas de este ensayo miden 50 mm • 50 mm • 150 mm, y ocurre la misma situación de la correlación de los tamaños de las probetas, manteniendo en este caso la proporción entre ancho y largo de 1:3, como se puede observar en la siguiente ilustración:



*Ilustración 13: Probeta compresión perpendicular a la fibra, pieza de 50 mm • 50 mm • 150 mm.  
Fuente: imagen extraída de Norma Chilena de Calidad Nch 974. Dimensiones en milímetros.*

Este ensayo no presenta roturas del material ni grandes deformaciones, los esfuerzos se generan en el plano tangencial a la dirección de las fibras, en donde se tiene que ubicar una placa de apoyo sobre la madera y que cubra un área cuadrada sobre ésta, de este modo que se tuvo que buscar en el laboratorio distintas placas de diferentes medidas para hacer calzar las muestras de maderas plásticas que llegaron de las distintas empresas.

Esta carga se aplica mediante la misma maquina Versa Tester y con una velocidad constante, como objetivo tiene que deformar 2,5 mm la carga a la madera. Si la deformación produce falla, eso nos indicará la carga máxima que puede soportar a compresión

perpendicular, si no genera falla se considera la carga en el momento en que se logren los 2,5 mm de deformación.

Los cálculos a desarrollar con este ensayo son:

Ecuación 4: Tensión unitaria de compresión perpendicular

$$f_{cn,lp} = \frac{Plp}{z \cdot a}, \text{ donde:}$$

Plp: Carga al límite de proporcionalidad

A: Promedio de los anchos medidos en la probeta

Z: ancho de la placa rígida

Ecuación 5: Tensión máxima o de rotura de compresión

$$R_{cn} = \frac{Q}{z \cdot a}, \text{ donde:}$$

Q: Carga máxima aplicada para la cual se obtiene la falla de la probeta o una deformación de 2,5 mm

Ecuación 6: Módulo de elasticidad por compresión perpendicular

$$E_{cn} = \frac{Plp \cdot h}{\sigma_{lp} \cdot z \cdot a}$$

H: promedio de alturas medidas en las probetas

$\sigma_{lp}$ : deformación en el límite de proporcionalidad

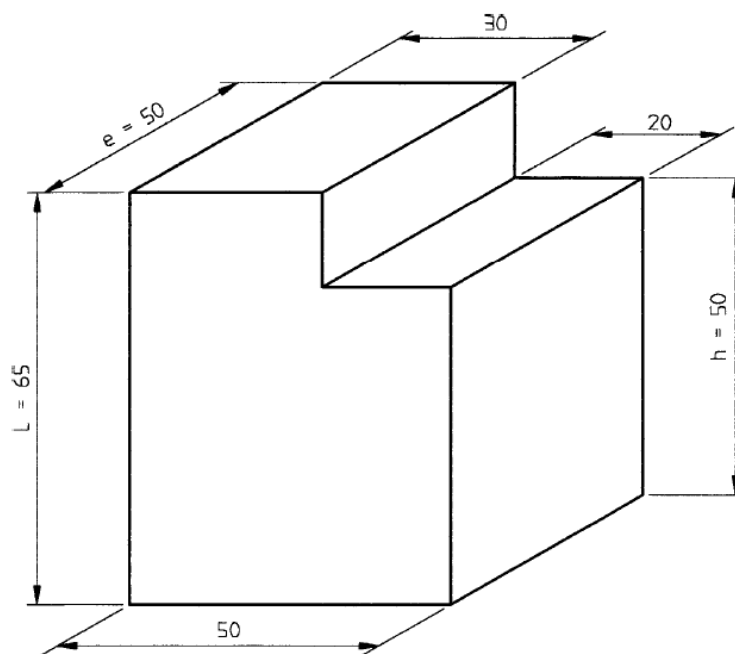
Los gráficos de las compresiones demostrarán el comportamiento de la madera plástica y su comparación con la madera natural, donde se observarán principalmente como les afectan los esfuerzos y si su resistencia es igual, superior o menor.

#### 4.3 Resistencia cizalle paralelo a las fibras

Nch 976 (Instituto Nacional de Normalización, Nch 976: Madera - Determinación de las propiedades mecánicas - Ensayo a cizalle paralelo a las fibras, 1986)

Este ensayo muestra el desempeño de las superficies internas del material y cuanta es la carga necesaria para provocar la ruptura de la probeta, las fallas se pueden describir como deslizamientos o cortes, dependiendo si son paralela a las fibras de la madera plástica o si atraviesan los planos de forma diagonal.

La probeta de ensayo tiene la figura de una T con unas dimensiones exteriores de 50 mm • 50 mm • 65 mm a la cual se le saca una parte de la pieza donde se va a guiar la falla y donde también se posiciona la pieza para generar la carga. La imagen adjunta proviene desde la norma citada, pero ahí explica que hay dos variantes, una en forma de L como ilustra en la imagen a continuación y otra en forma de T, como se podrá ver en anexos de este informe.



*Ilustración 14: Probeta ensayo corte a la fibra, pieza de 50 mm • 50 mm • 65 mm.*

*Fuente: imagen extraída de Norma Chilena de Calidad Nch 976. Dimensiones en milímetros.*

Las probetas generadas en el laboratorio se ensayan verticalmente y en sentido paralelo de las fibras, con el fin de determinar si genera principalmente desgarramiento de los planos o un corte en diagonal, la carga se aplica a una velocidad constante y con una

mordaza especial para dicho ensayo, el cual aplica la fuerza en una zona propensa a la falla, para determinar puramente el comportamiento.

La carga máxima en el momento de la falla determina la resistencia de la madera plástica, luego de eso se extrae para análisis visual del comportamiento y grietas generadas. Este esfuerzo de corte máximo se determina mediante:

Ecuación 7: Esfuerzo de corte máximo

$$Rv = \frac{Q}{h \cdot e}, \text{ donde:}$$

Q: carga a la cual falla la probeta

H: Promedio de medidas de altura del plano de falla de la probeta

E: Promedio de las medidas de los anchos del plano de falla de la probeta.

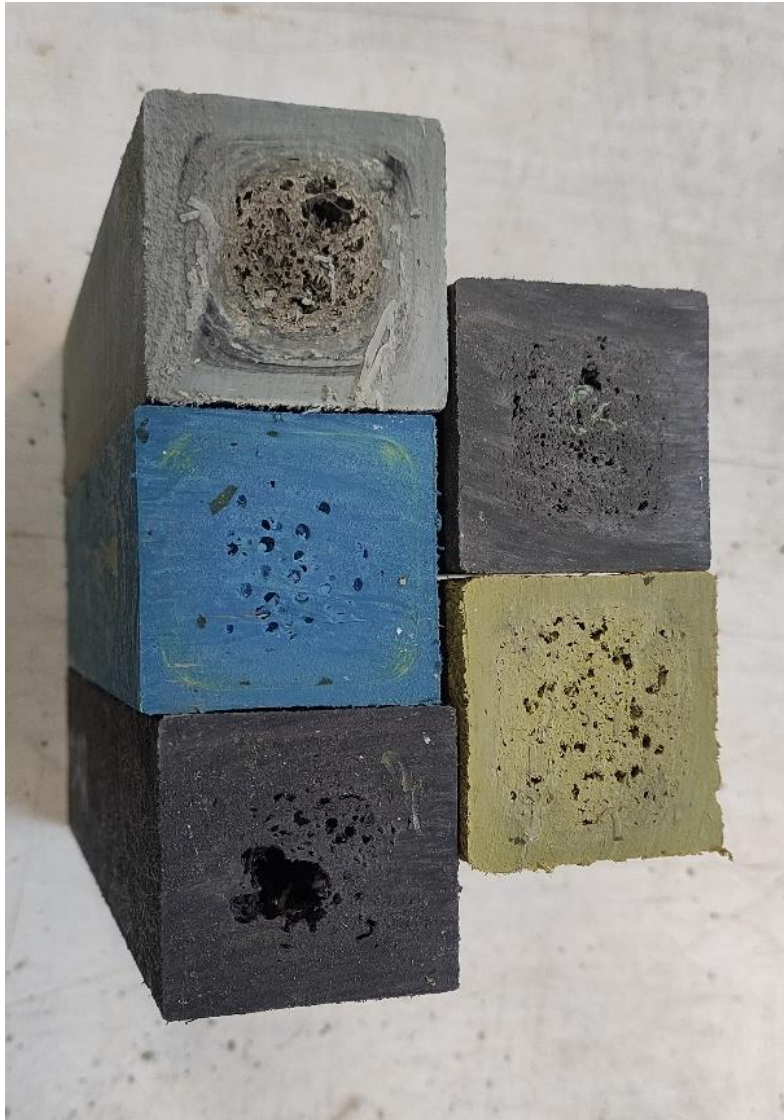
#### 4.4 Resistencia a la flexión estática

Nch 987 (Instituto Nacional de Normalización, Nch 987: Madera - Determinación de las propiedades mecánicas - Ensayo a flexión estática, 1986)

Este ensayo demuestra la capacidad que presenta la madera al doblarse para luego seguir con dos tipos de roturas: su aceptable capacidad de soportar el esfuerzo longitudinal y sufrir un desgarramiento o su fractura abrupta. El comportamiento que puede tomar puede ser elástico y/o plástico, para el caso de la madera natural posee una aceptable flexibilidad la que permite recuperar su forma inicial, y mediante los ensayos a realizar se determinará si la madera plástica posee también esta característica.

La madera convencional tiene la capacidad para sobrepasar su límite de elasticidad por flexión sin que se rompa fácilmente, permitiendo movimientos estructurales o curvaturas sin dañar el esqueleto de madera, guiándonos por su naturaleza, la madera plástica debería presentar un comportamiento más bien plástico, absorbiendo las cargas y con ello presentar cambios en su forma.

Para el caso de la madera plástica pueden influir en la resistencia los poros internos que se originan en la extrusión, como se puede observar en la siguiente imagen:

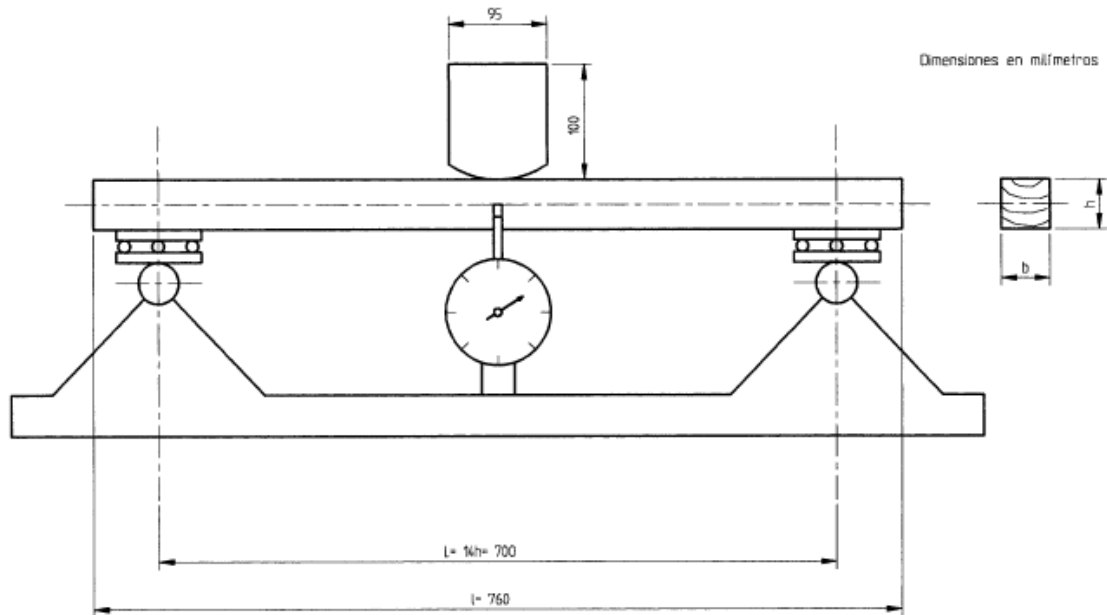


*Ilustración 15: Poros en madera plástica*

*Fuente: fotografía propia de maderas Evergood en laboratorio LEMCO*

Las probetas de este ensayo miden 50 mm • 50 mm • 760 mm, como ya es sabido las dimensiones de la madera plástica dependen de sus moldes por lo que se correlacionó las

dimensiones transversales de la madera y se mantuvo, para este caso, el largo y luz del ensayo. A continuación, una ilustración de la probeta del ensayo:



*Ilustración 16: Ensayo a flexión estática*

*Fuente: imagen extraída de Nch 987. Dimensiones en milímetros.*

La probeta se coloca en el sistema de ensayo a flexión, dejando una distancia entre apoyo de 700 mm, dejando libre 30 mm a cada lado de la madera y posicionada correctamente horizontalmente.

La madera plástica posee dos características importantes a mencionar que favorece en el ensayo, el primero, que, al ser impermeable la humedad no es factor para el desempeño de la madera y segundo, es que la construcción de la madera plástica no genera fallas en su estructura, no generando zonas débiles como lo puede ser un nudo o la inclinación de las fibras de la madera natural.

La carga a la madera se aplica con una palanca manualmente, haciendo bajar un cabezal justo en el centro de la probeta, con velocidad constante y midiendo tanto la deflexión

como la carga generada. Con estos datos de la curvatura de la madera y observando la carga en Kilogramos, se generan los gráficos y se analiza visualmente el tipo de falla que presente.

Los cálculos a realizar para este ensayo son:

Ecuación 8: Tensión unitaria de flexión en el límite de proporcionalidad

$$flp = \frac{3 \cdot Plp \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}, \text{ donde}$$

Plp: Carga en el límite de proporcionalidad

L: luz de ensayo

B: ancho de la probeta

H: altura de la probeta

Ecuación 9: Módulo de rotura a la flexión

$$Rf = \frac{3 \cdot Q \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}, \text{ donde}$$

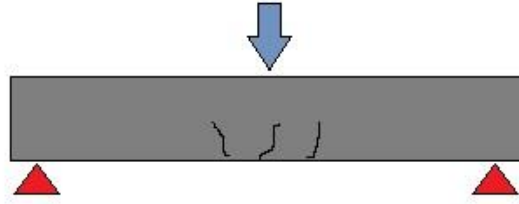
Q: carga máxima aplicada

Ecuación 10: Módulo de elasticidad a la flexión

$$Ef = \frac{Plp \cdot L^3}{4 \cdot \delta lp \cdot b \cdot h^3}, \text{ donde:}$$

$\delta lp$ : Deflexión en el límite de proporcionalidad

Ilustración con la falla abrupta presentada en los ensayos:



*Ilustración 17: Falla a flexión.*

*Fuente: Elaboración propia.*

## 5 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

### Densidad

La madera natural pino radiata, la más usada en Chile, tiene una densidad de aproximadamente 450 kg/m<sup>3</sup> (CORMA, 2003, pág. 26), por otro lado, la madera plástica estudiada posee una densidad desde los 850 kg/m<sup>3</sup> hasta los 1.000 kg/m<sup>3</sup> dato obtenido a través de mediciones en laboratorio LEMCO, lo que nos da un material el doble de denso que el natural.

### Resultados de ensayos mecánicos

#### 5.1 Resistencia a la compresión paralela

La tensión a compresión paralela en el límite de proporcionalidad corresponde a

$$f_{c, lp} = \frac{Plp}{a \cdot e}$$

$$f_{c,lp} = \frac{3000 \text{ kgf}}{62 \text{ mm} \cdot 62 \text{ mm}} = 0,78 \left( \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2} \right) \cong 7,64 \text{ MPa}$$

La tensión máxima o de rotura a compresión se calcula como la relación entre la carga última aplicada con la correspondiente área donde es aplicada en la madera, en donde la madera plástica de la empresa Timber Ecco, la más resistente, nos arroja como resistencia la siguiente:

$$R_c = \frac{Q}{a \cdot e}$$

$$R_c = \frac{12100 \text{ kgf}}{62 \text{ mm} \cdot 62 \text{ mm}} = 3,15 \left( \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2} \right) \cong 30,84 \text{ MPa}$$

Donde tenemos como comparación la tensión última del Pino Radiata:

$$R_c = 4,4 \left( \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2} \right) \cong 43,12 \text{ MPa}$$

**Obteniendo que la madera plástica resiste un 70% aproximadamente que el pino.**

Tabla 1: Contiene los datos del promedio de probetas ensayadas a compresión paralela a las fibras.

Probeta	Largo cm	Área transversal cm <sup>2</sup>	Carga máxima kg	Esfuerzo MPa
TimberEcco	24,8	38,44	12100	31
Revalora	20	25	5900	23
Evergood	24,8	38,44	9900	25
GoodWood	16	16	4500	28
Pino	20	25	11000	43

*Fuente: Elaboración propia*

Tabla 2: Resumen de esfuerzos a compresión paralela a la fibra.

Maderas	Esfuerzo MPa
Promedio	27
Máximo	31
Pino	43

Fuente: Elaboración propia

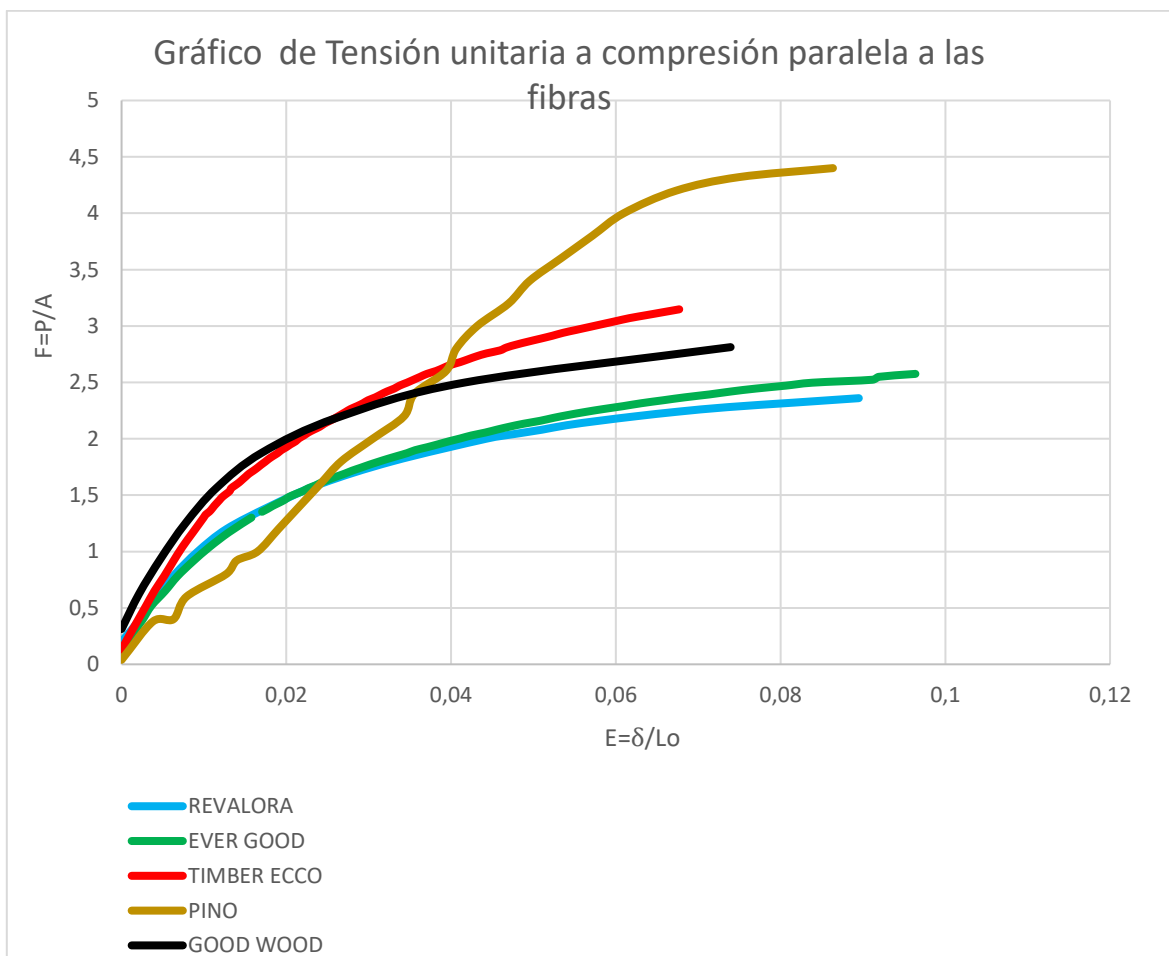


Ilustración 18: Gráfico compresión paralela.

Fuente: Elaboración propia con datos recolectados en laboratorio LEMCO.

Considerando que al comienzo de la compresión en las probetas ocurre una acomodación de sus partículas y no completamente la tensión a compresión, para el caso de la madera plástica se puede observar que los polímeros poseen un comportamiento elástico no lineal, sino que completamente plástico, lo que podría significar un bajo o nulo módulo de elasticidad en este material.

## 5.2 Resistencia a la compresión perpendicular

Debido a la conclusión del módulo de elasticidad a compresión paralela, para la tensión perpendicular sólo se calculará la tensión máxima o de rotura, donde se evalúa la carga aplicada cuando ocurre un desplazamiento de 2,5 mm:

$$R_{cn} = \frac{Q}{z \cdot a}$$

$$R_{cn} = \frac{9200 \text{ kgf}}{62 \text{ mm} \cdot 62 \text{ mm}} = 2,55 \left( \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2} \right) \cong 25,04 \text{ MPa}$$

Donde tenemos como comparación la tensión última del pino radiata:

$$R_{cn} = \frac{3150 \text{ kgf}}{50 \text{ mm} * 50 \text{ mm}} = 1,26 \left( \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2} \right) \cong 12,35 \text{ MPa}$$

**Comparando porcentualmente, la madera plástica con mejor comportamiento a tensión en el sentido perpendicular de las fibras es superior en un 200% que el pino radiata.**

Tabla 3: Datos obtenidos en ensayos de compresión perpendicular a las fibras.

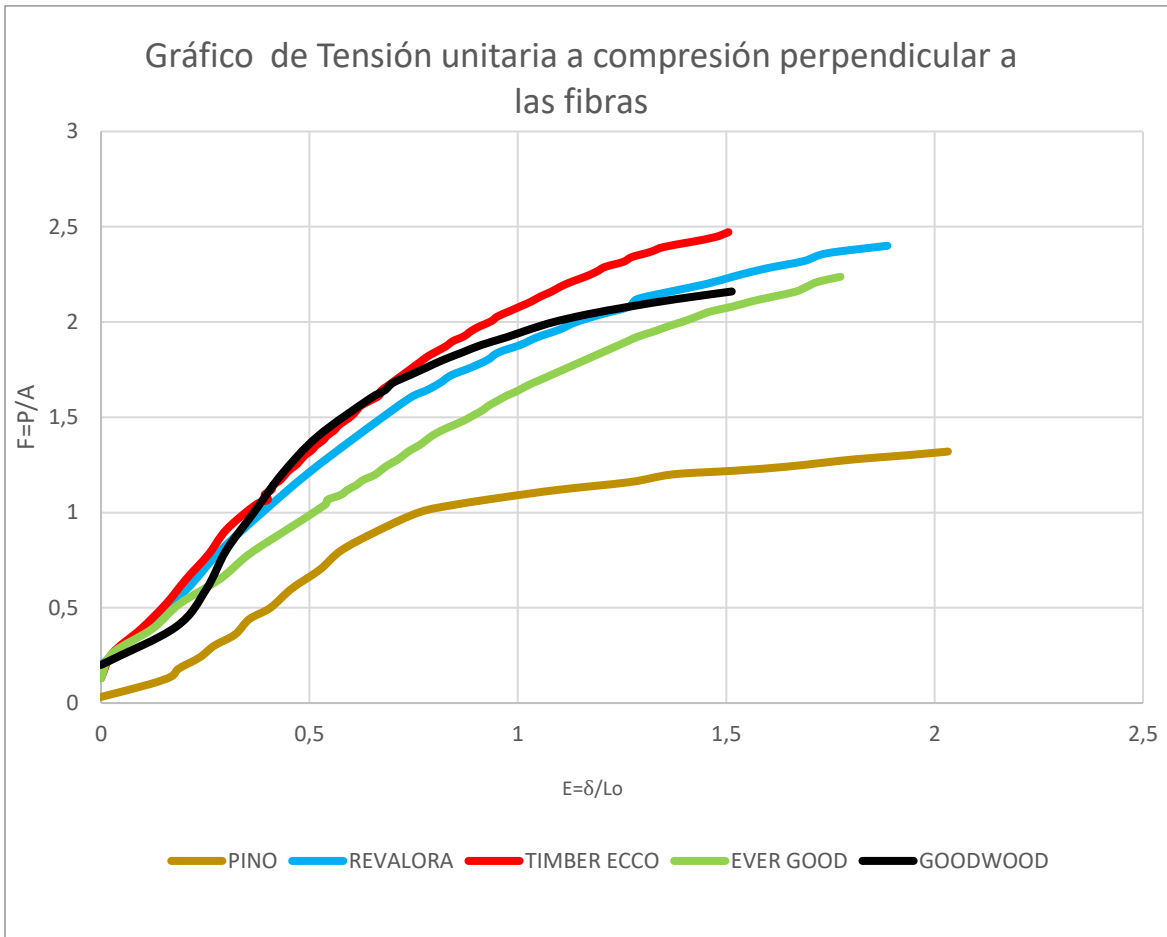
Probeta	Largo cm	Área transversal cm <sup>2</sup>	Carga máxima kg	Esfuerzo MPa
TimberEcco	18,6	38,44	9500	24
Revalora	15	25	7000	27
Evergood	18,6	38,44	8600	22
Goodwood	15	25	5400	21
Pino	15	25	3300	13

*Fuente: Elaboración propia*

Tabla 4: Resumen de resistencias a esfuerzos a compresión perpendicular a la fibra.

Maderas	MPa
Promedio	24
Máximo	27
Pino	12

*Fuente: Elaboración propia*



*Ilustración 19: Compresión perpendicular.*

*Fuente: Elaboración propia con datos recolectados en laboratorio LEMCO.*

### 5.3 Resistencia cizalle paralelo a las fibras

La carga máxima en el momento de la falla es con la cual se determina el esfuerzo de corte último, el cual se calcula de la siguiente manera:

$$Rv = \frac{Q}{h \cdot e}$$

$$Rv = \frac{3022 \text{ kgf}}{50 \text{ mm} \cdot 50 \text{ mm}} = 1,2 \left( \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2} \right) \cong 11,85 \text{ MPa}$$

Donde se tiene como referencia al pino radiata:

$$Rv = \frac{2340 \text{ kgf}}{50 \text{ mm} \cdot 50 \text{ mm}} = 0,94 \left( \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2} \right) \cong 9,17 \text{ MPa}$$

**Obteniendo una comparación porcentual del 120% siendo la madera plástica más resistente en este sentido de las tensiones.**

#### 5.4 Resistencia a la flexión estática

El esfuerzo a flexión último o de rotura se calcula de la siguiente manera para la madera plástica:

$$Rf = \frac{3 * Q * L}{2 * b * h^2}$$
$$Rf = \frac{3 * 450 \text{ kg} * 9,8 \left( \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) * 700\text{mm}}{2 * 62 \text{ mm} * (62 \text{ mm})^2} = 19,8 \text{ MPa}$$

Donde como comparación tenemos al pino radiata:

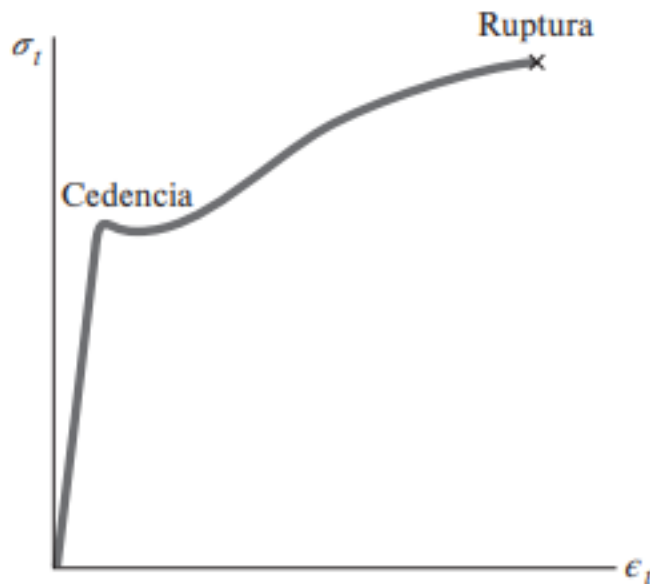
$$Rf = 62,7 \text{ MPa}$$

**Comparación porcentual, la mejor madera plástica resiste un 30% aproximadamente de lo resistido por la madera tradicional pino en flexión.**

## 6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

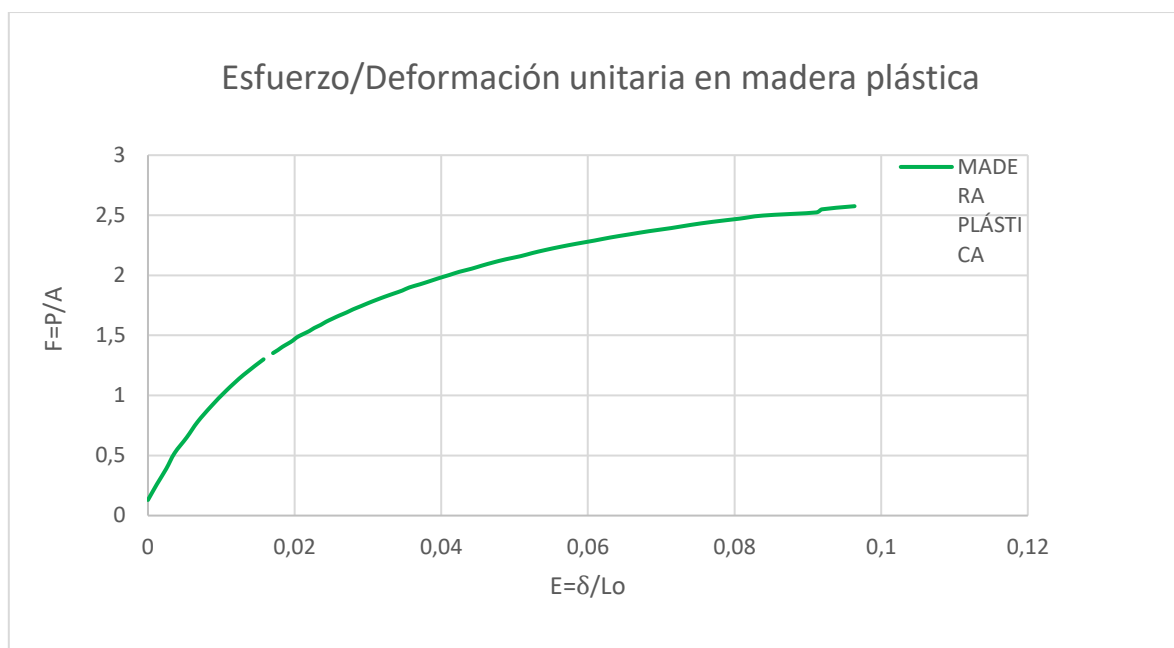
El estudio realizado a la madera plástica para conocer sus características físicas y mecánicas nos llevó a un resultado que es un material apto para construir y soportar esfuerzos a compresión, no importando el sentido en el que se aplique, pero se debe considerar que en sentido de carga perpendicular a las fibras, posee un comportamiento muy superior a la madera natural, lo que nos podría llevar a la construcción de elementos con aceptables características mecánicas. De aquí desprendemos que la madera plástica por su forma de fabricación si posee anisotropía y si es determinante para el futuro uso del material.

Con respecto al módulo de elasticidad de la madera plástica, se puede observar el siguiente fenómeno: desde el estudio de distintos materiales y el comportamiento de sus moléculas, al ser aplicado esfuerzos se obtiene el característico diagrama de deformaciones que se ilustra a continuación:



*Ilustración 20: Gráfico carga versus deformación.  
Fuente: Libro de Mecánica de materiales Biblioteca USM (Beer, 2015).*

En donde se pueden observar dos zonas, la primera que corresponde al rango elástico del material y ocurre al comienzo donde que se aplican esfuerzos al material, hasta donde está escrita la palabra “Cedencia”, y la segunda, que comprende la continuación hasta “Ruptura” perteneciendo éste al rango del comportamiento plástico.



*Ilustración 21: Gráfico carga versus deformación en madera plástica.  
Fuente: elaboración propia con datos obtenidos en laboratorio LEMCO. Valparaíso, Chile.*

Como se puede observar, la madera plástica al ser un material completamente polimérico se comporta como tal y refleja que sufre sólo deformaciones de este tipo, por lo que se infiere, que su módulo de elasticidad es muy bajo.

Por otro lado, los ensayos a flexión arrojaron resultados muy bajos respecto a la madera natural, concluyendo que el material no presenta resistencia por su naturaleza de la materia prima y también por su fabricación, en donde se puede observar un absoluto comportamiento plástico. Cabe destacar que este ensayo fue exigente para las maderas plásticas debido a que la luz de ensayo fue factor determinante en la calidad de las maderas plásticas, donde sólo 2 empresas fabrican una madera con una resistencia del 30% del pino y donde las otras 3 restantes, no se opusieron a los esfuerzos logrando una alta deformidad,

quedando a la vista que el factor fabricación y correcta conglomeración de sus ingredientes es determinante.

Por último, el material bajo tensiones de corte resiste por sobre la madera natural, y experimenta tanto una resistencia como una falla similar. Por lo que resistencia a compresión y cortante podrían ser futuros elementos constructivos reemplazantes de la madera natural.

Resistencia compresión paralela a las fibras 70% que madera natural.

Resistencia compresión perpendicular a las fibras 200% que la madera natural.

Resistencia al corte 120% que madera natural.

Resistencia a flexión un 30% que madera natural.

## 7 CONCLUSIONES

Como principal conclusión se obtiene que el material es altamente utilizable en la construcción considerando un uso en su sentido más resistente, además de poder emplearse en condiciones ambientales desfavorables para materiales corrientes, en donde puede soportar desde sustancias corrosivas hasta largas exposiciones, donde no presenta variaciones en su composición, ni deformaciones y por lo mismo, requiere una menor mantención y sustitución.

No existió complejidad en la correlación de dimensiones para poder comparar los esfuerzos realizados por las distintas muestras de madera plástica. Por otro lado, se observó una diferencia en el comportamiento de las muestras bajo esfuerzos, donde el módulo de elasticidad para la madera fabricada a base de polímeros no tiene relación con la de la madera natural. Por lo mismo, la madera natural será mejor constructivamente, a flexión, ya que su deformación permite movimientos o deslizamientos versus la rotura abrupta la que presenta la madera plástica en ese sentido.

Considerando las características físicas del material y las condiciones que pueden soportar, actualmente se construyen bancas para parques, juegos infantiles, pérgolas, mobiliario para patios, etc. y posterior al estudio, se abren otros posibles usos en donde la resistencia sea factor y no así su condición plástica, donde se podría nombrar, por ejemplo: durmiente ferroviario o reductores de velocidad para vías vehiculares, los cuales requieren una alta resistencia perpendicular a las fibras a compresión y la exposición no afectaría a la vida útil de los elementos.

Por su naturaleza, la madera plástica resulta beneficiosa para el medio ambiente por estar creada con materiales de desecho, reduciendo niveles de contaminación, menor tala de árboles, proteger ecosistema, creando nuevas industrias y utilizando miles de kilos plástico desechado diariamente para crear un elemento constructivo.

Teniendo en cuenta que es un material no estudiado y que por lo mismo sus alcances están reducidos, se puede concluir que finalmente la madera plástica es apta para la fabricación de elementos diseñados para soportar tensiones de compresión y esfuerzos

cortantes, como lo son columnas, pilares y elementos de unión, no olvidando que la densidad duplica a la de la madera natural, factor a considerar para futuros diseños.

Debido a que este es el primer acercamiento del material, queda guiado el camino para la continuación del estudio y de las posibles futuras prestaciones que se necesiten, por ejemplo: paneles, vigas, elementos compuestos (por ejemplo, vigas tipo I), construcción de elementos armados con un esqueleto de acero u otro material reciclado, fabricación con ingredientes que alivianen el peso, construcciones en zonas donde materiales necesitan constante reemplazo, etc. Todo a favor de mejorar las cualidades mecánicas y para aprovechar su resistencia ambiental a condiciones adversas con la poca mantención que necesita la madera plástica.

Por último, hay que recordar que este material está recién comenzando con sus primeras apariciones, pruebas y fabricaciones; las extrusoras en Chile se están recién importando y sus configuraciones de parámetros aún son experimentales, así que estamos en camino para mejorar este material y es actualmente un nicho de innovación.

## 8 BIBLIOGRAFÍA

- Beer, F. P. (2015). *Mecánica de materiales*. Mc Graw Hill Education. Obtenido de <https://bibliotecadigital.usm.cl/info/mecanica-de-materiales-00644736?locale=es>
- CORMA. (2003). *Pino radiata*. Chile: Corporacion Chilena de la Madera CORAMA. Obtenido de <https://www.madera21.cl/wp-content/uploads/2016/11/Compendio-de-directrices-para-ense%C3%B1anza-en-ingenier%C3%ADa.pdf>
- EFE. (22 de Febrero de 2022). En Chile se generan 17 millones de toneladas de residuos al año, de las cuales 7 millones corresponden a residuos domiciliarios. De estos últimos, sólo el 10% se recicla. Con esta nueva Ley se espera llegar al 30% de residuos reciclados en 5 años. Para lo. *Diario Financiero*. Obtenido de <https://www.df.cl/df-lab/sostenibilidad/ocde-a-pesar-de-que-residuos-de-plastico-se-han-duplicado-este-siglo>
- Elliana, S. (15 de Julio de 2022). Entrevista respecto a la madera plástica. (M. Morales, Entrevistador) Santiago.
- EVERGOOD. (2023). *Web de Evergood*. Obtenido de <https://everwood.cl/producto/postes-cuadrados/>
- Fernández, N. (2023). El impulso de la industria del reciclaje en Chile y los desafíos de la Ley REP. *País Circular*. Obtenido de <https://www.paiscircular.cl/opinion/reciclaje-ley-rep-desafios-industria/>
- Instituto Nacional de Normalización . (1986). *Nch 973: Madera - Determinación de las propiedades mecánicas - Ensayo de compresión paralela*. Santiago, Chile: INN.
- Instituto Nacional de Normalización. (1986). *Nch 974: Madera - Determinación de las propiedades mecánicas - Ensayo a compresión perpendicular a las fibras*. Santiago, Chile: INN.
- Instituto Nacional de Normalización. (1986). *Nch 976: Madera - Determinación de las propiedades mecánicas - Ensayo a cizalle paralelo a las fibras*. Santiago, Chile: INN.
- Instituto Nacional de Normalización. (1986). *Nch 987: Madera - Determinación de las propiedades mecánicas - Ensayo a flexión estática*. Santiago, Chile: INN.
- Maldonado Caballero, C. (17 de Junio de 2019). PET, el plástico que abunda en Chile pero que hoy se debe importar para sostener una industria de reciclaje clave para la Ley REP. *País Circular*. Obtenido de [https://www.paiscircular.cl/consumo-y-produccion/pet-el-plastico-que-abunda-en-chile-pero-que-hoy-se-debe-importar-para-sostener-una-industria-de-reciclaje-clave-para-la-ley-rep/#:~:text=Envases%20y%20embalajes-,PET%2C%20el%20pl%C3%A1stico%20que%20abunda%](https://www.paiscircular.cl/consumo-y-produccion/pet-el-plastico-que-abunda-en-chile-pero-que-hoy-se-debe-importar-para-sostener-una-industria-de-reciclaje-clave-para-la-ley-rep/#:~:text=Envases%20y%20embalajes-,PET%2C%20el%20pl%C3%A1stico%20que%20abunda%20)

- Nichols, A. (2014). *Architectural Structures: From, Behavior, and Desing Arch 331*. Obtenido de ARCH 331 - Architectural Structures: [http://faculty-legacy.arch.tamu.edu/anichols/index\\_files/courses/arch331/notes6.pdf](http://faculty-legacy.arch.tamu.edu/anichols/index_files/courses/arch331/notes6.pdf)
- Salazar, Á., Quintero, C., & Fonthal, G. (2016). Revisión de la Norma ISO-N314-22157 para estandarizar los ensayos a compresión paralela en la guada angustifolia Kunth. *Revista técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad de Zulia*, 59. Obtenido de <https://ve.scielo.org/pdf/rftiuz/v39n2/art02.pdf>
- Thiers Montandon, M. (2016). *Evaluación de factibilidad técnico-económica para proyecto de producción de perfiles plásticos en la región de los lagos*. Santiago de Chile.
- Urroz, F. (29 de Abril de 2023). Tres empresas que apuestan por darle nueva vida (y valor) al plástico. *Diario Financiero*. Obtenido de <https://dfmas.df.cl/capital/cultura/estilo-de-vida-ed/tres-empresas-que-apuestan-por-darle-nueva-vida-y-valor-al-plastico>
- Van Der Meer, L. (8 de Junio de 2023). Día Mundial de los Océanos: ¿qué estamos haciendo para frenar la contaminación por plásticos de un solo uso? *País Circular*, 1. Obtenido de <https://www.paiscircular.cl/opinion/dia-mundial-de-los-oceanos-que-estamos-haciendo-para-frenar-la-contaminacion-por-plasticos-de-un-solo-uso/>
- XXI, C. (12 de Septiembre de 2022). *Web de Clave XXI*. Obtenido de <https://clavexxi.es/extrusion-plastico/>

## 9 ANEXOS



*Ilustración 22: Ensayo compresión paralela.  
Fuente: fotografía propia en laboratorio LEMCO. Valparaíso, Chile.*



*Ilustración 23: Ensayo cizalle.  
Fuente: fotografía propia en laboratorio LEMCO. Valparaíso, Chile.*



*Ilustración 24: Ensayo flexo-tracción.  
Fuente: fotografía propia en laboratorio LEMCO. Valparaíso, Chile.*



*Ilustración 25: Husillo extrusores.  
Fuente: fotografía propia en empresa que fabrica hilos extrusores. Santiago, Chile.*



*Ilustración 26: Falla al corte.  
Fuente: fotografía propia en laboratorio LEMCO. Valparaíso, Chile*