



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍA DE LA MADERA**



**CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE
LÁMINAS ACANALADAS HECHAS A BASE DE MADERA Y PLÁSTICO**

TESIS PROFESIONAL

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO EN TECNOLOGÍA DE LA MADERA

PRESENTA:

EDUARDO RAYA AGUILAR

DIRECTOR DE TESIS:

RAÚL ESPINOZA HERRERA

Doctor en Tecnología de la Madera

Morelia, Michoacán, octubre 2014.

Agradecimientos

Le doy gracias a mis padres M.A. Rosa y J. Jesús por apoyarme en todo momento, por los valores que me han inculcado, y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida.

A mis hermanos por ser parte importante de mi vida y representar la unidad familiar. A Angélica, Antonio y Javier por ser un ejemplo de desarrollo profesional a seguir.

A mi director de tesis, Dr. Raúl Espinoza Herrera por su esfuerzo, sus comentarios y sugerencias durante el desarrollo de esta investigación.

Gracias a Christian Octavio Ramírez García por habernos brindado la oportunidad de desarrollar el proyecto de tesis profesional en ECOLAMINADOS S.A. de C.V. y por todo el apoyo y facilidades que nos fueron otorgadas en la empresa. Por darnos la oportunidad de crecer profesionalmente y aprender cosas nuevas.

A mis amigos y compañeros de la carrera, con los cuales aprendí y disfrute con ustedes mis horas de estudio.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE CUADROS

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE FÓRMULAS

RESUMEN

ABSTRACT

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	ANTECEDENTES	3
	2.1 Madera-plástico (WPC)	3
	2.2 Deterioro y propiedades del WPC	4
	2.3 Materiales compuestos a base de madera	7
3.	JUSTIFICACIÓN	9
4.	OBJETIVOS	11
5.	GENERALIDADES	12
	5.1 Caracterización de la mezcla madera-plástico	12
	5.1.1 Madera	12
	5.1.2 Propiedades térmicas de la madera y plástico	12
	5.1.3 Propiedades de combustión y resistencia al fuego de la madera-plástico	14
	5.1.4 Propiedades acústicas	16
	5.1.5 Densidad	18
	5.1.6 Envejecimiento acelerado del plástico	18
	5.2 Compuestos a base de madera y plástico (WPC)	18
	5.2.1 Materias primas para la elaboración de los WPC	19
	5.2.2 Fibras de madera	22
	5.2.3 Agentes modificantes de los WPC	23
	5.3 Otras láminas compuestas de sustancias inorgánicas	25

5.3.1	Láminas de fibrocemento.....	25
5.3.2	Láminas de fibra de vidrio.....	25
5.3.3	Láminas de poliuretano y láminas de poliestireno.....	26
5.4	Métodos de conformado de los WPC.....	26
5.4.1	Extrusión.....	26
5.4.2	Inyección.....	27
5.4.3	Moldeo por compresión.....	28
5.5	Usos de los WPC.....	29
6.	MATERIALES Y METODOS.....	30
6.1	Material experimental.....	30
6.1.1	Maquinado de Probetas.....	31
6.2	Evaluación física de la LMP y los materiales de referencia.....	31
6.2.1	Determinación de la Densidad.....	32
6.2.2	Determinación de la dureza.....	33
6.2.3	Hinchamiento del espesor y absorción de agua ASTM (D-1037).....	34
6.2.4	Pruebas de degradación por medio de tres ciclos de inmersión en agua y secado.....	36
6.3	Evaluación térmica de la LMP y los materiales de referencia.....	37
6.3.1	Ensayo de resistencia al fuego.....	37
6.3.2	Pruebas de comportamiento al fuego.....	39
6.4	Evaluación de las propiedades acústicas de la LMP y los materiales de referencia.....	42
6.5	Evaluación mecánica de la LMP y los materiales de referencia.....	43
6.5.1	Ensayo de extracción de tornillos.....	43
6.6	Evaluación de la resistencia mecánica de la superficie en la LMP.....	43
6.7	Análisis estadístico.....	44
7.	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	45
7.1	Propiedades físicas.....	45
7.1.1	Densidad (ρ).....	45
7.1.2	Dureza.....	45

7.1.3	Hinchamiento del espesor.....	46
7.1.4	Análisis de la absorción de agua.....	47
7.1.5	Análisis de degradación por medio de tres ciclos de inmersión en agua.....	48
7.2	Análisis de las propiedades térmicas y resistencia al fuego.....	50
7.2.1	Método de inflamabilidad.....	50
7.2.2	Análisis de conductividad térmica mediante fósforos.....	51
7.2.3	Análisis de conductividad térmica mediante termopar.....	52
7.2.4	Análisis de aplicación de carga bajo el fuego.....	53
7.3	Propiedades acústicas de la LMP y los materiales de referencia.....	54
7.4	Propiedades mecánicas.....	56
7.4.1	Análisis de la resistencia a la extracción de tornillos.....	56
7.4.2	Análisis de la resistencia mecánica de la superficie en la LMP.....	57
7.4.3	Clasificación y resumen de resultados de las propiedades físicas y mecánicas de la LMP en base a los materiales de referencia.....	58
8.	CONCLUSIONES.....	60
9.	RECOMENDACIONES.....	61
10.	BIBLIOGRAFIA.....	62
11.	ANEXOS.....	71

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 5.1. Composición porcentual de la madera.....	12
Cuadro 5.2. Clasificación de la intensidad del sonido en decibeles (dB) en diferentes entornos y ambientes (así funciona, 2014).....	17
Cuadro 6.1. Dimensiones de las láminas de madera-plástico.....	31
Cuadro 7.1. Resultados de la determinación de la densidad.....	45
Cuadro 7.2. Determinación de la dureza de la LMP y los materiales de referencia, en unidades HD.....	45
Cuadro 7.3. Resultados del hinchamiento del espesor de la LMP (%).....	46
Cuadro 7.4. Ensayo de absorción de agua de la LMP (%).....	47
Cuadro 7.5. Valores de la absorción de agua durante la prueba de degradación (%).....	48
Cuadro 7.6. Valores del hinchamiento del espesor durante la prueba de degradación (%).....	49
Cuadro 7.7. Resultados de los ensayos de combustión de la LMP y los materiales de referencia	50
Cuadro 7.8. Tiempo de ignición del fosforo a través de la LMP y los materiales de referencia.....	51
Cuadro 7.9. Temperaturas (°C) registradas durante el ensayo de conductividad térmica de los materiales evaluados.....	53
Cuadro 7.10. Valores de resistencia de los materiales bajo la acción del fuego.....	54
Cuadro 7.11. Cantidad de sonido (dB) reflejado por los materiales a diferentes alturas.....	55
Cuadro 7.12. Resultados de la resistencia a la extracción de tornillos (kg).....	56
Cuadro 7.13. Prueba de resistencia de carga (kg/cm ²), sin ciclos de degradación.....	57
Cuadro 7.14. Prueba de resistencia de carga (kg/cm ²), con ciclos de degradación.....	57
Cuadro 7.15. Clasificación de propiedades de la lámina hecha a base de madera y plástico....	58
Cuadro 7.16. Resumen de las propiedades de la LMP y los materiales de referencia.....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 5.1. Diagrama de extrusión de los WPC.....	27
Fig. 5.2. Proceso de inyección del WPC.....	28
Fig. 5.3. Moldeo por compresión del WPC.....	28
Fig. 6.1. Diagrama de flujo para la elaboración de la lámina de madera-plástico (LMP).....	30
Fig. 6.2. Evaluación física y mecánica de la LMP y los materiales de referencia.....	32
Fig. 6.3. Determinación de masa de la LMP.....	32
Fig. 6.4. Determinación del volumen de la LMP.....	32
Fig. 6.5. Determinación de la dureza de la LMP y materiales de referencia.....	33
Fig. 6.6. Probeta utilizada para los ensayos de hinchamiento del espesor y absorción de agua.....	34
Fig. 6.7. Determinación del espesor de los ensayos.....	34
Fig. 6.8. Ensayos de hinchamiento del espesor y absorción de agua.....	34
Fig. 6.9. Inmersión en agua de las probetas.....	36
Fig. 6.10. Secado en estufa de las probetas.....	36
Fig. 6.11. Tubo de combustión (ASTM E69-99).....	37
Fig. 6.12. Registro del peso inicial en la prueba de combustión.....	38
Fig. 6.13. Verificación de temperatura en el tubo de fuego.....	38
Fig. 6.14. Ensayos de pruebas de combustión.....	38
Fig. 6.15. Registro del peso final en la prueba de combustión.....	39
Fig. 6.16. Quemador múltiple para pruebas térmicas y de resistencia al fuego.....	40
Fig. 6.17. Colocación de fósforos, en la prueba de conductividad térmica.....	40
Fig. 6.18. Ensayo de conductividad térmica, cuando se alcanza la temperatura de ignición.....	40
Fig. 6.19. Colocación del sensor y medición de la transmisión de calor a través de la lámina por medio de termopar.....	41
Fig. 6.20. Condiciones alcanzadas durante la prueba de conductividad térmica por medio de termopar.....	41
Fig. 6.21. Probeta soportando 2.5 kg bajo la acción del fuego.....	41

Fig. 6.22. Probeta vencida por el fuego y la carga.....	41
Fig. 6.23. Medidor digital de nivel de sonido.....	42
Fig. 6.24. Determinación del ruido de la LMP y los materiales de referencia.....	42
Fig. 6.25. Máquina universal Shimadzu.....	43
Fig. 6.26. Esquema del ensayo de extracción de tornillos.....	43
Fig. 6.27. Esquema del accesorio del ensayo de superficie a carga.....	44
Fig. 6.28. Ensayo de superficie a carga.....	44
Fig. 7.1. Comparación de la dureza (HD) de la LMP, con los materiales de referencia.....	46
Fig. 7.2. Inspección inicial de las muestras.....	48
Fig. 7.3. Inspección final de las muestras.....	48
Fig. 7.4. Pérdida de peso de la LMP y el material de referencia.....	51
Fig. 7.5. Tiempo de ignición del fosforo a través de la LMP y los materiales de referencia....	52
Fig. 7.6. Conductividad térmica mediante termopar a través de los materiales evaluados.....	53
Fig. 7.7. Resistencia bajo la acción del fuego de la LMP y la lámina de Asbesto.....	54
Fig. 7.8. Generación de ruido a diferentes alturas de la LMP y los materiales de referencia....	55
Fig. 7.9. Extracción de tornillos sobre la cara de la LMP y los materiales de referencia.....	56
Fig. 7.10. Comparación de la resistencia de la LMP sin ciclos y con ciclos de degradación....	58

ÍNDICE DE FÓRMULAS

Fórmula 1. Determinación de la densidad (ρ).....	33
Fórmula 2. Determinación del hinchamiento del espesor (%He).....	35
Fórmula 3. Determinación de la absorción de agua (%A _b).....	35
Fórmula 4. Determinación de la pérdida de peso (%P _p).....	39

RESUMEN

En la actualidad, a nivel mundial hay una creciente búsqueda de nuevos materiales con mejores propiedades y bajo costo. Existen materiales compuestos madera-plástico, los cuales son fabricados a base de mezclas de desperdicios de plásticos reciclados y partículas o fibras de madera provenientes de aserraderos y fábricas de muebles. Sin embargo, hay poca información respecto a las características de estos materiales. Por lo cual, el objetivo del presente estudio fue caracterizar las propiedades físicas y mecánicas de láminas acanalas hechas a base de madera y plástico (LMP) obtenidas mediante un proceso de extrusión en la empresa ECOLAMINADOS S.A de C.V. Para su fabricación se utilizó un polietileno reciclado de baja densidad, el cual fue mezclado con fibras de madera de pino, aditivos y pigmentos. Las láminas presentaron una densidad de 1.27 g/cm^3 . La LMP presenta una alta estabilidad dimensional durante los ensayos de absorción de agua e hinchamiento del espesor. La LMP presentó mayor conductividad térmica que los tableros de hojuela orientada (OSB), aglomerado, contrachapado y fibra de madera (MDF). Sin embargo, una conductividad térmica menor que la lámina de asbesto. La LMP presentó una pérdida de masa de 76.9 % de acuerdo al método de tubo de fuego. En pruebas de degradación por medio de ciclos de inmersión de agua y secado, la lámina presentó una decoloración leve y disminuyó su resistencia en un 38.5%. En las propiedades mecánicas presentó una resistencia a la extracción de tornillos de 49.1 kg, y una dureza de 69 HD. Finalmente, la LMP presentó un mejor comportamiento durante la prueba de generación de ruido comparadas con la lámina de asbesto y la lámina de fibra de vidrio. Los resultados demostraron que la LPM tiene buenas propiedades tanto físicas como mecánicas para sombreados y techumbres.

Palabras claves: Lámina madera-plástico (LMP); Compuestos madera-plástico (WPC); polietileno reciclado; residuos de madera.

ABSTRACT

Currently, there is a growing search for new materials with improved properties and low costs. Wood-Plastic Composites, are manufactured from mixtures of waste recycled plastics, wood fibers or particles obtained from sawmills and furniture factories. However, there is little information about the characteristics of these materials. Therefore, the objective of this study was to characterize the physical and mechanical properties of from Wood Plastic Sheets (WPS) obtained by an extrusion process in the factory ECOLAMINADOS S.A. de C.V. Recycled low density polyethylene was used for this manufacturing, which was mixed with pine wood fibers, additives and pigments. The sheets had a density of 1.27 g/cm^3 . The WPS had high dimensional stability during water absorption tests and thickness swelling. The WPS showed higher thermal conductivity than oriented strand-boards (OSB), particleboard, plywood and fiberboard (MDF). However, the showed a lower thermal conductivity than that of asbestos sheets. The WPS presented a mass loss of 76.9% according to the method of fire tube. In tests for degradation by water immersion cycles and dried, WPS showed a slight discoloration with a resistance decreasing of 38.5%. The screw withdrawal was 49.1 kg whereas, the hardness was 69 HD. Finally, WPS performed better during the noise generating test compared with asbestos and fiberglass sheets. Overall, results showed that the WPS has both good physical and mechanical properties for using in roofs and shaded places.

Keywords: Wood-Plastic Sheets (WPS); Wood-Plastic Composites (WPC); recycled polyethylene; wood waste.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el crecimiento constante de la población ha ocasionado diferentes problemáticas en todo el país, entre las cuales se encuentran: falta de viviendas para la población, especialmente para familias de bajos recursos y por otro lado el creciente deterioro ambiental ocasionado por la generación de desechos no biodegradables. En este sentido, se requieren propuestas viables para contrarrestar estos problemas. Entre las soluciones que existen hoy día, es la búsqueda de nuevos materiales de construcción, empleando nuevas tecnologías que disminuyan el impacto ambiental, de bajo costo en su elaboración y de procesamiento sencillo.

Por sus características, los llamados compuestos madera-plástico o WPC (wood plastic composites, por sus siglas en inglés), se convierten en una alternativa para la fabricación de nuevas formulaciones de materiales compuestos, debido principalmente a razones ambientales y de costos (English *et al.* 1997; Wambua *et al.* 2003). Son resistentes a la humedad e insectos y no presentan pudrición, deformación ó astilladuras, como la madera tradicional (Li y Matuana, 2003).

Actualmente, el volumen de producción de productos plásticos que contienen madera y fibras aumenta considerablemente en todo el mundo (Ichazo *et al.* 2001; Bledzki *et al.* 2005). Son usados especialmente en la industria de la construcción, para revestimiento, marcos para puertas y ventanas, perfiles y tubos, piezas de robots y aplicaciones en el sector del mueble (Bledzki *et al.* 2005; Bledzki y Faruk, 2006).

El desarrollo del presente estudio se ha centrado en un material compuesto formado por polietileno de baja densidad como matriz termoplástica y reforzado con un relleno de madera de pino, obtenido mediante un proceso de extrusión. El cual es una lámina acanalada hecha de un compuesto de madera y plástico 100% reciclable.

El presente trabajo pretende reunir los elementos necesarios para caracterizar las propiedades físicas y mecánicas a fin de conocer el comportamiento físico y los niveles de resistencia en la lámina, en función de su tiempo de vida, simulando en el laboratorio las condiciones ambientales que con más probabilidad sufrirán los materiales en aplicaciones reales.

Asimismo se realizó un estudio comparativo con muestras de materiales de referencia, como una contribución al conocimiento tecnológico de productos compuestos, que repercutirá en un beneficio directo a la empresa ECOLAMINADOS S.A de C.V, ubicada en la ciudad de Morelia, Michoacán, México.

2. ANTECEDENTES

Durante la recopilación de información, no se encontraron trabajos que aborden el estudio de las propiedades térmicas, resistencia al fuego, y las propiedades acústicas de los materiales compuestos a base de madera y plástico, solo existen trabajos que se refieren principalmente a la elaboración y evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales plásticos. Por lo tanto estas propiedades mencionadas anteriormente serán comparadas con otros tableros compuestos de madera que son destinados a la construcción.

Existen trabajos que se desarrollaron durante el año 2007, por el Grupo de Investigación en Materiales de Ingeniería, quienes desarrollaron un proyecto de investigación de análisis de materiales reciclados, como el polipropileno (PP) y el polietileno de baja densidad (LDPE) en la fabricación de madera plástica (París y González 2009). Así como también un proyecto de investigación por parte de Klyosov (2007) y Espinoza (2002) sobre diversos materiales compuestos.

Este apartado se dividió en tres partes, la primera relacionada a los WPC, la segunda incluye los estudios del deterioro y propiedades del WPC, y la tercera abarca investigaciones de otros materiales compuestos a base de madera.

2.1 Madera-plástico (WPC)

Bajo el término de “Wood Plastics Composites” o WPC, se agrupan los materiales compuestos constituidos por una matriz polimérica, termoestable o termoplástica y un componente de madera en cualquiera de sus formas (aserrín, fibras vegetales, etc.) que actúa como refuerzo (Clemons, 2002).

La fabricación de compuestos de madera plástico ha sido un proceso industrial durante la década de 1980 y 1990 (Lu *et al.* 2000). Además, la importancia y el potencial de crecimiento de los compuestos plásticos de madera se evidenciaron en 1991 por la llegada de la conferencia internacional sobre la madera compuesta de fibra de plástico (Smith, 2001).

Las primeras aplicaciones industriales de compuestos de madera plásticos se informaron a finales de 1960 (Rowell *et al.* 2000). Son producidos en sistemas de resinas termoendurecibles tales como resinas epoxi y resinas fenólicas. Pueden ser repetidamente fundidos a 200 °C, tales

como el polietileno (PE), polipropileno (PP), cloruro de polivinilo (PVC) y poliestireno (PS), (Youngquist 1995, Lu *et al.* 2004).

Lundin *et al.* (2004), Ashori y Nourbakhsh (2008), Adhikary *et al.* (2008), Ashori y Nourbakhsh (2009), indican que existe en la actualidad una cantidad de trabajos realizados con diversas poliolefinas en condición virgen, reforzados con fibra de madera y otras fibras de origen natural, utilizando sistemas de extrusión e inyección. El polietileno representa casi un 70% de los plásticos utilizados en la manufactura de los materiales compuestos a base de madera y plástico.

Desde la aparición de los polímeros hasta la fecha, son múltiples las aplicaciones y las facilidades para transformarlos que los han hecho atractivos para ser utilizados en campos donde antes solo se usaba metales, maderas, o cerámicos (Córdoba *et al.* 2010). Su primer uso comercial fue como una palanca de cambios de automóviles Rolls Royce en 1916 (Gordon, 1988).

2.2 Deterioro y propiedades del WPC

La caracterización de los polímeros reciclados utilizados como materia prima en la elaboración de compuestos a base de madera plástico determinan la importancia que ésta tiene como etapa inicial en el proceso productivo que afecta directamente las propiedades físico-mecánicas finales del producto (París y González, 2009).

La resistencia es, sin duda, una de las principales ventajas del plástico. Por ello, los elementos fabricados a partir del plástico reciclado tienen multitud de cualidades. El plástico reciclado tiene mayor resistencia que la madera, es estéril, imperecedero, aislante, insensible al agua y la humedad, a los agentes químicos, rayos UV, organismos vivos como las bacterias o los insectos. Además, resulta muy fácil de lavar y desinfectar. Pueden ser aserrados, clavados, atornillados, lijaos, pulidos, taladrados, engrapados y encolados. Se fabrican en diferentes colores, como negro, gris, marrón, verde, etc. Posteriormente también se pueden pintar o lacar de tonos distintos (Ecorenova, s/f).

Por otro lado, la madera es un material higroscópico que tiende a ganar y perder humedad dependiendo del medio ambiente donde se encuentra, esta ganancia o pérdida de humedad se

ve reflejada en hinchamientos o contracciones de la madera. Además es un material biodegradable, que tiende a deteriorarse por el ataque de hongos, bacterias e insectos. Entre los principales efectos de la acción de organismos xilófagos en la madera, están la modificación química de las moléculas de celulosa y de lignina, y la desintegración de fibrillas y de la pared celular. Estas averías provocan la destrucción del tejido leñoso y la aparición de fisuras y perforaciones en la madera, trayendo como consecuencia la disminución de su densidad y de su resistencia mecánica. (Meyer y Kellogg, 1982; Nicholas y Loos, 1973; Rowell y Barbour, 1990; Zabel y Morrell, 1992).

Mengelloglu y Matuana (2004); Faruk *et al.* (2007) y Klyosov (2007), indican que los compuestos madera-plástico presentan ciertos inconvenientes como el ser más frágiles y tener menos resistencia que los productos de plástico virgen. De igual manera, la densidad de los compuestos madera-plástico es superior a ciertos plásticos y es casi el doble a la madera sólida. Debido a estas deficiencias, la utilización de estos compuestos es limitada y están impidiendo que sean competitivos y alcancen su pleno potencial en el mercado convencional de la madera estructural y en otras aplicaciones no estructurales.

Youngquist (1999), menciona que los termoplásticos como matriz continúa en forma de gránulos tienen una densidad en un intervalo de 0.5 a 0.6 g/cm³. Y el componente lignocelulósico que sirve como un refuerzo o de relleno tiene una densidad de 0.025 a 0.25 g/cm³.

Paris y Gonzales (2009), realizaron mediciones de tipo experimental a un WPC, utilizando mediciones de volumen y pesos de las muestras, obteniendo que la densidad para un compuesto a base de madera mezclado con un polietileno de baja densidad es de 0.69 g/cm³.

Mientras que Klyosov (2007), menciona que los compuestos a base de madera y plástico presentan densidades en un rango de 0.91-0.95 g/cm³. Sin embargo, este parámetro es controlable a través de la adición de agentes de acoplamiento que aumentan la densidad de WPC en un 1.13 g/cm³ a 1.20 g/cm³, respectivamente. Esto a su vez contribuye a disminuir la absorción de agua de los materiales compuestos.

Klyosov (2007), indica que los materiales de WPC absorben cantidades variables de humedad, algunos más, otros menos. Cuando los WPC se sumergen en el agua, absorben humedad

típicamente entre 0.7 y 3% en peso después de 24 h de la inmersión. Este valor al ser comparado con la absorción de agua por la madera, tal como madera tratada a presión, que absorbe alrededor del 24% de agua en peso después de 24 h de inmersión. Cuando se sumerge en agua durante mucho más tiempo, los materiales de WPC comerciales absorben hasta 30% de agua, mientras que la madera más de 100% en peso. También menciona este autor que los materiales compuestos de polietileno y fibra de madera absorben 0.001 g/cm^3 y los compuestos a base de polipropileno absorben 0.008 g/cm^3 a 24 horas de inmersión en agua.

Siau (1975), realizó pruebas de combustión de un compuesto plástico, encontrando que la madera con un polímero tuvo menor propagación de la flama y menor cantidad de humo que una madera sin tratar.

En los últimos años la investigación sobre estos productos se ha enfocado preferentemente a mejorar la interacción físico-química entre los materiales altamente polares derivados de la madera y los plásticos de baja polaridad por su naturaleza poliolefínica (Lu *et al.* 2004).

Debido a que la geometría de la madera influye en las propiedades finales del producto. Las fibras lignocelulósicas incrementan la dureza y rigidez del material compuesto siempre que la adhesión interfacial sea buena (Stark y Rowlands, 2003).

Actualmente, existe una búsqueda de sustancias, que permitan mejorar las deficiencias que presentan los compuestos madera-plásticos. Recientemente, el concepto de la creación de estructuras celulares espumadas está siendo incorporada a través de procesos de extrusión e inyección y se ha demostrado mejoras significativamente en estas deficiencias (Faruk *et al.* 2007; Rivzi *et al.* 2008). Debido a la presencia de burbujas, la densidad del compuesto madera-plástico se ha reducido considerablemente, disminuye el costo y disminuyen las mejoras en la ductilidad y resistencia, como lo indican Matuana *et al.* (1996, 1997 y 1999); Kishbaugh *et al.* (2002); Bledzki y Faruk (2006).

Estos espumantes con agentes de acoplamiento podrían mejorar significativamente las propiedades mecánicas. Debido a que el comportamiento mecánico de los compuestos, depende principalmente del tamaño fino y distribución de las células de los compuestos (Bledzki y Faruk, 2006).

En general, los compuestos fabricados con aserrín de madera y polietileno presentan un aumento de la rigidez y bajos costos resultante del producto y son actualmente usados en la industria de la construcción para revestimiento, marcos para puertas y ventanas y cubiertas como reemplazo a la madera tradicional. Estos productos son resistentes a la humedad, ataque de hongos e insectos y no presentan pudrición, deformación, astillados, a comparación con la madera tradicional (Bledzki y Gassan, 1999; Li y Matuana, 2003). Sin embargo, según Klyosov (2007), los compuestos pueden sufrir o presentar cambios o variar sus propiedades de aspecto y de alta durabilidad, forma, absorción de humedad, resistencia a la decoloración, resistencia microbiana y a la humedad, flamabilidad y otras propiedades, debido a las composiciones con las que son fabricados.

2.3 Materiales compuestos a base de madera

Algunos productos compuestos de madera aglutinadas con sustancias inorgánicas, son resistentes al agua y pueden soportar rigores de la aplicación en exteriores y casi todos son a prueba de fuego o altamente resistentes a él y también al ataque del hongo de la pudrición. Entre este tipo de materiales se encuentra el tablero aislante del sonido, tablero de fibra de yeso y los bloques de construcción de baja densidad de madera aglutinada con cemento (Rowell y Youngquist, 1991; Falk, 1994).

Los compuestos de madera aglutinados con sustancias minerales son paneles moldurados o tableros que contienen aproximadamente del 10-70% de peso de partículas de madera o fibras y casi del 30-90% de peso del aglutinante mineral. Las propiedades de los compuestos son influenciadas significativamente por el cementante inorgánico, la cantidad del material maderable y por la densidad de los compuestos (Simatupang, s/f; citado por Espinoza, 2002).

Corona (2008), caracterizó física y mecánicamente un material compuesto a base de aserrín y cemento. Determinando que el material compuesto tiene una absorción de agua máxima y en resistencia al fuego el material se calcinó y la conductividad acústica presenta una intensidad de onda baja y lo considera como un buen aislante acústico.

Por otro lado, Espinoza (2002), estudio el comportamiento físico-mecánico de tableros a base de yeso y partículas de madera comparándolos con los tableros convencionales. Determinándose que no presentaron cambios dimensionales en hinchamiento del espesor ni en

el sentido longitudinal, la resistencia a la flexión fue baja así como a la tensión paralela y extracción de tornillos, con buenas propiedades acústicas y de comportamiento al fuego.

Chow *et al.* 1988; citado por Espinoza (2002), utilizaron tableros contrachapados, tableros chapados waferboard, OSB y tableros de fibra duros, para hacer un análisis de la extracción de clavos y grapas, encontrando que al sumergir los materiales en agua por 24 horas y someterlos a 6 ciclos de envejecimiento acelerado, se reduce la resistencia a la tracción alrededor de 30% y 40%.

3. JUSTIFICACIÓN

Los plásticos utilizados habitualmente en la industria e incluso en la vida cotidiana son productos con una muy limitada capacidad de degradación y quedan durante muchos años como residuos generando contaminación (París y González, 2009).

En consecuencia, cada día es más clara y necesaria la recuperación de los restos plásticos por dos razones principales: La contaminación que provocan y el valor económico que representan (English *et al.* 1997; Wambua *et al.* 2003). Los denominados polietilenos (PE) de baja, media y alta densidad, polipropilenos (PP), polivinilos clorados (PVC), poliuretanos y otros plásticos industriales que nos acompañan en la vida cotidiana son materiales de altísima calidad, no son tóxicos y con una gran ventaja, que pueden volverse a utilizar para fabricar nuevos productos.

Sin embargo; no todos los plásticos pueden ser reciclados fácilmente, pero la importancia desde la perspectiva ecológica es la misma. En el área del reciclaje existen los métodos llamados primario, secundario, terciario y cuaternario. El primario tiene que ver con la utilización de partes del plástico pero en aplicaciones diferentes y se le obtiene por recortes del material original. El secundario es el más empleado y es el utilizado en esta investigación y se refiere a la fusión, de los desechos que son convertidos en productos de diferentes formas y con mayor espectro de aplicaciones, las cuales son diferentes a las del plástico original. El terciario es un proceso de tipo químico, consistente en el aprovechamiento de los componentes químicos del plástico, el cual se realiza mediante descomposición química, el cuaternario, consiste en la incineración para recuperar energía (Córdoba *et al.* 2010).

Por otro lado, los residuos de madera que tradicionalmente se han considerado como inofensivos para el medio ambiente debido a su carácter natural y no peligroso, también compiten económicamente con su recuperación y reciclado.

Los residuos de madera se componen de recortes de madera, astilla, aserrines o harinas, virutas, embalajes, muebles, puertas, tablonés, ramas, etc. Se generan en todo el sector de procesamiento de madera. Tras un proceso de recolecta y tratamiento, los residuos de madera son destinados a la fabricación de tablero aglomerado y tablero de partículas, producción de energía a través de plantas de biomasa, etc. Sin embargo, la reutilización de residuos de madera como refuerzo de materiales poliméricos es otra alternativa ecológica que despierta

gran interés. Se caracterizan por su bajo costo y baja densidad. No obstante, presentan limitaciones derivadas de su incompatibilidad con algunos polímeros, su tendencia a formar agregados durante el procesado y su alta absorción de humedad, lo cual limita su empleo como refuerzo (Arroyo y López, 2003).

En resumen, la combinación de la madera como material de relleno con los métodos tradicionales de transformación de la industria del plástico, da como resultado productos mixtos con propiedades similares a los termoplásticos, de relleno altamente compacto, que presentan un aspecto similar a la madera. Los productos pueden ser atornillados, taladrados o serrados de la misma forma que la madera, pero al mismo tiempo permiten su procesado como materiales termoplásticos. En consecuencia, resultan aplicaciones muy diversas en ámbitos como construcción de casas y mobiliario exterior.

4. OBJETIVOS

Objetivo general.

Determinar las propiedades físicas y mecánicas de láminas acanaladas hechas a base de madera y plástico (LMP).

Objetivos particulares.

Realizar la determinación de:

- La densidad y dureza de la LMP
- La absorción de agua e hinchamiento del espesor de la LMP
- La degradación por ciclos de inmersión en agua y secado de la LMP
- Las propiedades térmicas y resistencia al fuego de la LMP
- La generación de ruido por impacto de la LMP
- La resistencia a extracción de tornillos de la LMP
- La resistencia mecánica de la superficie de la LMP

5. GENERALIDADES

5.1 Caracterización de la mezcla madera-plástico

5.1.1 Madera

La madera está compuesta de forma general por tres grupos de sustancias. Las que conforman la pared celular (componentes estructurales), donde se encuentran las principales macromoléculas, celulosa, poliosas (hemicelulosas) y ligninas, que están presentes en todas las maderas; el otro grupo lo conforman las sustancias de baja masa molecular (componentes no estructurales) conocidas también como sustancias extraíbles, que se encuentran en menor cantidad y por último, las sustancias minerales (Bland, 1985). La proporción y composición química de la lignina y las hemicelulosas difiere para los distintos tipos de maderas (Browning 1967).

De forma general, la composición de la madera se presenta en el Cuadro 5.1.

Cuadro 5.1. Composición porcentual de la madera.

Componente	Composición %
Celulosa	44-50
Hemicelulosa	20-25
Lignina	16-33
Extraíbles	5-10

Fuente: Browning (1967); Fengel y Wegener (1984).

5.1.2 Propiedades térmicas de la madera y plástico

Como toda sustancia o material, la madera se ve afectada en sus características y propiedades por la variación de la temperatura y la acción de calor. Sin embargo, ante estas acciones la madera presenta cualidades muy ventajosas que la hacen ideal en muchos usos (Fuentes, s/f)

Dada la gran sensibilidad que presentan los plásticos frente a la temperatura, la caracterización térmica es tan importante como la mecánica. Las técnicas de termografía proporcionan gran cantidad de información sobre la estructura y composición del plástico.

De las propiedades térmicas en el caso de la madera, son base de estudio la dilatación, el calor específico y la conductividad térmica:

Dilatación

La dilatación se define como el cambio de dimensiones provocado por un cambio de temperatura. La dilatación térmica de la madera es muy pequeña en comparación con otros materiales como: aceros, concretos y plásticos. Las moléculas que integran la madera tienen una carga de energía que las mantiene en movimiento o vibración. Cuando aumenta la energía interna por defecto del aumento en la temperatura, aumenta la vibración de estas moléculas y a la vez la distancia entre las mismas. Esta situación da como resultado una expansión lineal y volumétrica en las piezas de madera (Fuentes, s/f). Como todos los materiales para la construcción, los plásticos se dilatan y contraen al aumentar y disminuir la temperatura.

Calor específico

El calor específico se define como la cantidad de calor, en calorías, necesario para aumentar en 1 °C la temperatura de 1 g de una materia. La madera tiene un calor específico muy elevado, es decir, que al aumentarle una cantidad determinada de calor, la temperatura que alcanza es mucho más baja que en otros cuerpos de menor calor específico; razón por lo que se le prefiere en algunos usos como utensilios de cocina y mangos de herramientas (Fuentes, s/f).

El valor del calor específico del hierro y el cobre es de 0.1 Kcal/Kg-°C, para el hormigón es de 0.18 Kcal/Kg-°C y el de la madera, entre 0.4 y 0.7 Kcal/Kg-°C según el contenido de humedad de la misma. (Fuentes, s/f ; Kollmann, 1959).

Conductividad térmica

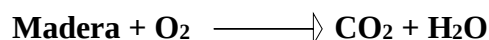
La conductividad térmica o termoconductividad de la madera, se determina por medio de la cantidad de calor que se tiene que agregar a una pieza en una de sus caras, para mantener un estado de equilibrio en relación con el calor que pierde a través de la cara opuesta (Fuentes, s/f).

Comparados con los metales, los plásticos son aislantes del calor. La mayoría de los plásticos sólidos no modificados tienen coeficientes de transmisión del calor más altos que la madera en dirección perpendicular a la fibra, pero inferiores a los del cristal, ladrillos u hormigón. Los coeficientes de los plásticos reforzados, laminados o con cargas, dependen de la naturaleza de los aditivos (Arredondo, 1972; CSIC, 1990; Ramos y Marín, 1988)

En la madera, la conductividad térmica se ve afectada por la densidad, por el contenido de humedad y por los extractivos que presenta la madera. Además estos factores se ven afectados principalmente por la temperatura, presencia de defectos en la madera y la orientación de las microfibrillas (Fuentes, s/f; Grigoriev, 1985; Ricalde y Bárcenas, 1989; USDA, 1987)

5.1.3 Propiedades de combustión y resistencia al fuego de la madera-plástico

La combustión de la madera resulta de la combinación del carbono e hidrógeno, con el oxígeno, formando bióxido de carbono (CO₂) en primer caso y agua (H₂O) en el segundo:



El efecto de la temperatura en la combustión de la madera, según Benítez y Romero (1985); y Wilkins y Murray (1980), se puede resumir como sigue:

- **Temperaturas inferiores a los 100 °C**, existe pérdida de agua libre por secado de la madera.
- **Temperaturas entre 100 °C y 150 °C**, la madera comienza a deshidratarse en sus paredes celulares.
- **Temperaturas entre 150 °C y 1200 °C**, Se consideran temperaturas críticas para el desarrollo de combustión. Con estas temperaturas se logra la ignición de la madera siempre y cuando las condiciones ambientales favorezcan el proceso. Debido a la carbonización, el color de la madera se oscurece lentamente, continúa la deshidratación y da inicio el desprendimiento de gases. Estos gases contienen cerca de 70 % de CO₂, el cual no es combustible.
- **Temperaturas cerca de los 275 °C**, comienza un rápido desprendimiento de humos y gases, reduciendo la cantidad de bióxido y monóxido de carbono. Existe una formación rápida de productos inflamables y el poder calorífico de estos gases se eleva

considerablemente. En esta etapa da inicio a lo que se le conoce como “combustión viva”, debido al desprendimiento acelerado de los gases que produce grandes llamas y además da lugar a la formación del carbón vegetal.

- **Temperatura cercana a los 400 °C**, cesan los humos desprendidos de la madera y existe una pérdida rápida de peso.
- **Temperaturas entre 450 °C y 500 °C a 800 °C**, Termina la producción de alquitranes, se amortigua la combustión por el agotamiento de los gases, continuando con mayor lentitud la combustión del carbón vegetal.
- **Temperaturas de 800 °C y 1200 °C**, se produce la combustión total del carbón vegetal.

Combustión del plástico

La combustión de un plástico depende de la propagación de las sustancias que entran en su composición, no solo los polímeros, muchos aditivos, como los plastificantes pueden provocar una reacción de combustión. Muchos polímeros, al igual que otros compuestos orgánicos, al estar cerca de una fuente de ignición externa, provocan en la atmósfera una combustión autosostenida. Durante la combustión, el calor desarrollado es suficiente para elevar la temperatura y se emiten gases y vapores inflamables, el proceso se activa, con la formación de llamas y propagación de fuego (Estrucplan On Line, s/f)

Según Estrucplan On Line (s/f), cuando se habla de combustión de plásticos hay dos términos que son utilizados; LOI (índice de oxígeno limitado) y la temperatura de ignición:

- **LOI:** Relación porcentual entre la cantidad de oxígeno necesaria para mantener la combustión después de producirse la ignición y la masa total de gas existente en la atmósfera.
- **Temperatura de ignición:** valor de temperatura a la cual el calor desarrollado por influencia de la fuente de ignición y de factores ambientales (temperatura exterior y la falta de ventilación del local) puede ser suficiente para provocar la combustión de un sólido.

Además de estos dos términos, se tiene en cuenta las sustancias (gases y vapores) emitidos, considerando además las partículas sólidas presentes en la combustión, especialmente el hollín.

Toxicidad de productos emitidos

La principal causa de muerte y daños a personas durante la combustión de la madera, se debe a la inhalación de gases tóxicos, humos y gases calientes; principalmente el monóxido de carbono. Gran cantidad de sustancias emitidas en la combustión de los plásticos son inofensivas para el hombre, si no alcanzan una alta concentración ambiental. Otras pueden generar un efecto negativo sobre el organismo y dependerá de la sustancia, la concentración y el tiempo de exposición (Estrucplan On Line, s/f).

Pruebas contra el fuego

Las pruebas contra el fuego ayudan a caracterizar la resistencia de los materiales de construcción ante el fuego.

Un ensayo de fuego puede permitir comprobar si los requisitos específicos de seguridad contra incendios se están cumpliendo. Por ejemplo, Reyes (2001), evaluó la madera mediante el método de tubo de fuego, con dos productos comerciales para retardar el fuego, obteniendo una pérdida de peso del 73.02 %, mientras que para una madera sin tratamiento obtuvo una mayor pérdida de 82.74%.

Los métodos empleados son muy variables en los diversos países, debido a que en cada uno existen normas y reglamentos de construcción diferentes. En las pruebas contra el fuego se diferencian los siguientes tipos:

- a) **Resistencia al Fuego.** Mediante este ensayo se pretende evaluar el comportamiento frente al fuego de los elementos empleados en el ámbito de la construcción, valorando durante cuánto tiempo un elemento sigue cumpliendo la función para la que estaba destinado cuando se desarrolla un incendio.
- b) **Reacción al Fuego.** Estos ensayos tienen como objetivo evaluar la contribución que puede tener un material en el inicio, desarrollo y propagación de un incendio.

5.1.4 Propiedades acústicas

Las propiedades acústicas estudian el comportamiento de los materiales al contacto con ondas sonoras. Las principales propiedades acústicas que más se manifiestan en los materiales son:

Aislamiento acústico

Se refiere a la reducción de la intensidad de sonido al pasar a través de un material. La unidad de medida para la intensidad del sonido es el decibel (dB).

Un sonido de 40-70 dB produce efectos psicológicos leves, mientras que 70 y 100 dB puede producir reacciones de estrés, cansancio y alteración del sueño. Los ruidos entre 100 y 120 dB, denominado “umbral tóxico”, pueden llegar a ocasionar lesiones del oído medio. Mientras que los ruidos superiores a los 120 dB entran en el denominado “umbral del dolor”, es decir, son ruidos insoportables que provocan sensación de dolor en el oído humano (cuadro 5.2).

Cuadro 5.2. Clasificación de la intensidad del sonido en decibeles (dB) en diferentes entornos y

ENTORNO	AMBIENTE	DECIBELES (dB)
Estudios de radio, televisión y grabación de sonido	Silencioso	0 a 20
Áreas residenciales de noche, hospitales y conversaciones a no más de 1 m de distancia	Poco ruidoso	40 a 70
Tráfico intenso en la calle	Muy ruidoso	70 a 100
Despegue de un avión de reacción o una nave espacial a 1 m de distancia	Insoportable	120 a 180

Fuente: Así funciona (2014).

Absorción acústica

Se refiere a la cantidad de sonido que es absorbido por una superficie al incidir en ella. Para que exista una alta absorción del sonido se requiere de materiales blandos y porosos. Las planchas de lana de madera poseen una elevada absorción de sonido gracias a su gran porosidad interna y superficial. Las maderas contrachapadas ofrecen hasta un 25 % de absorción del sonido, especialmente para los tonos bajos (Fuentes, s/f).

Conductividad acústica

Es la propiedad de conducir el sonido a través de un material. En la madera, el sonido se propaga con mayor velocidad a lo largo de las fibras, con menor velocidad en dirección radial

y muy lentamente en el eje tangencial. La propagación del sonido es proporcional a la resistencia a la deformación que presente el material y a su densidad (Fuentes, s/f).

5.1.5 Densidad

La densidad (símbolo ρ) es una magnitud escalar referida a la cantidad de masa en un determinado volumen de una sustancia.

Según Echenique-Manrique y Plumpré (1994), la madera presenta un rango de densidades que van de 0.28 a 0.9 g/cm³ (anexo I).

La densidad de los compuestos de madera y plástico depende principalmente del contenido de madera en el compuesto, la densidad aumenta proporcionalmente de forma lineal, tanto para el polietileno (PE) como para polipropileno (PP). El rango de densidades de los plásticos es relativamente bajo y se varía entre 0.9 y 2.3 g/cm³, tal y como se muestra en la tabla del Anexo II. La densidad de otros materiales es mayor, como el aluminio con densidad 2.7 g/cm³ o el acero con 7.8 g/cm³ (Beltrán y Marcilla, s/f).

5.1.6 Envejecimiento acelerado del plástico

Estos ensayos sirven de gran ayuda para conocer potencial duración y/o comportamiento de una pieza o producto acabado, cuando están sometidos a un ambiente o condiciones determinadas. Dependiendo de la estructura del plástico y del medio en el que se encuentre, éste se comportará de forma diferente.

Utilizando cámaras de ensayo (niebla salina, cámara climática y de envejecimiento a la luz) se puede reproducir la influencia de la radiación solar, la temperatura, la lluvia, la humedad, etc. y comprobar si el material se degrada, cambia de color, si presenta tensiones en su estructura, si el recubrimiento o pintura, si es el caso, es atacado o no está bien adherido, etc. (Martínez, 2010).

5.2 Compuestos a base de madera y plástico (WPC)

La elaboración de productos manufacturados a base de composites de madera y polímeros lleva más de 25 años comercializándose en EE.UU. y otros países europeos, y muestra numerosas ventajas tanto técnicas, como ambientales, como son su resistencia, inalterabilidad

y contribución al reciclado de residuos (Leaversuch, 2000; Clemons, 2002). Existen numerosas publicaciones científicas y técnicas en los últimos años (Hedenberg y Gatenholm, 1996; Biedzki, *et al.* 1996; Carvalho y Batista, 1995), que proporcionan información al respecto.

5.2.1 Materias primas para la elaboración de los WPC

Los materiales compuestos son fabricados a base de mezclas de polímeros sintéticos y harinas o fibras vegetales, son de creciente interés en la ciencia e ingeniería de materiales. Algunas de las formulaciones obtenidas pueden presentar similares o mejores propiedades que los mismos plásticos sintéticos, con la ayuda de determinados aditivos químicos, como los agentes acoplantes y plastificantes (Youngquist *et al.* 1995, Rowell *et al.* 1998, Jayaraman y Bhattacharyya 2004, Lucchetta *et al.* 2006, Yeh *et al.* 2009). Sin embargo, existe escasa información sobre la formulación de compuestos que no contengan estos aditivos químicos.

Polipropileno (PP)

El polipropileno se obtiene a partir del gas del petróleo. Es un material termoplástico incoloro y muy ligero. Además, es un material duro, y está dotado de una buena resistencia al choque y a la tracción, tiene excelentes propiedades eléctricas y una gran resistencia a los agentes químicos y disolventes a temperatura ambiente. El polipropileno tiene una dureza y una resistencia térmica superiores a las del polietileno de alta densidad, pero una resistencia al impacto inferior y se vuelve quebradizo por debajo de 0 °C. Por su gran resistencia al calor, se emplea en la fabricación de objetos que precisan esterilización, como aparatos eléctricos, embalajes, estuches de cintas, fibras, monofilamentos y tapaderas de refrescos (Cervantes *et al.* 2006)

Cervantes, *et al.* (2006) mencionan algunas propiedades mecánicas y químicas para el polipropileno:

Propiedades Físicas

- La densidad del polipropileno, está comprendida entre 0.90 y 0.93 gr/cm³.
- Es un material más rígido que la mayoría de los termoplásticos.
- Posee una gran capacidad de recuperación elástica.

Propiedades Mecánicas

- Puede utilizarse en calidad de material para elementos deslizantes no lubricados.
- Tiene buena resistencia y dureza superficial, y estabilidad dimensional.
- Tiene buena resistencia química a la humedad y al calor sin deformarse.

Propiedades Químicas

- Tiene naturaleza apolar, y por esto posee gran resistencia a agentes químicos.
- Presenta poca absorción de agua, por lo tanto no presenta mucha humedad.
- Tiene gran resistencia a soluciones de detergentes comerciales.
- El polipropileno como los polietilenos tiene una buena resistencia química.

Polietileno (PE)

El PE es el plástico de mayor volumen producido en el mundo. Tiene una temperatura de fusión baja (106 y 130 °C), lo que permite el uso de fibra celulósica sin mucho riesgo de degradación significativa. El polietileno es un polímero semicristalino. Esto significa que a temperatura ambiente el polímero se compone de dos fracciones distintas, o bien fases cristalinas y amorfas. La parte amorfa de polietileno, que es una especie de goma a temperatura ambiente, se convierte en un cristal con una cierta temperatura de transición vítrea (Klyosov, 2007).

El polietileno es bastante suave, muestra casi nula absorción de humedad (por debajo de 0.02% después de 24 h de inmersión en agua) y muy alta resistencia a productos químicos, incluidos los ácidos fuertes, tales como ácido sulfúrico, clorhídrico y nítrico. El polietileno presenta una resistencia a la oxidación relativamente alta en comparación con otros polipropilenos, por lo tanto, requiere menor cantidad de antioxidantes para su transformación (Klyosov, 2007).

Las principales formas de polietilenos son:

- a) Polietileno de alta densidad (HDPE ó PEAD)

El PEAD (en inglés conocido como HDPE), su densidad es de 0.941 g/cm³. Tiene un bajo nivel de ramificaciones, por lo cual su densidad es alta, las fuerzas intermoleculares son altas

también. La producción de un buen PEAD depende de la selección del catalizador (Cervantes *et al.* 2006).

Según Enderle (2008), algunas propiedades físicas y mecánicas del HDPE son las siguientes:

- Resistente a las bajas temperaturas, resistencia a la tensión, compresión y tracción.
- Baja densidad en comparación con metales u otros materiales
- Impermeable y presenta alta resistencia química
- No tóxico, bajo costo y poca estabilidad dimensional.

Algunas de sus aplicaciones son: bolsas plásticas, envases de alimentos, detergentes, y otros productos químicos, artículos para el hogar, juguetes, dispositivos protectores (cascos, rodilleras, coderas etc.), impermeabilización de terrenos (vertederos, piscinas y estanques), empaques para partes automotrices y tarimas.

b) Polietileno de densidad media (MDPE)

El polietileno de media densidad, es un tipo de polietileno definido por una gama de densidades de 0.926-0.940 g/cm³ (Cervantes, *et al.* 2006). El MDPE se utiliza en cañerías para gas y accesorios, bolsas, película extensible, película para envoltorios, bolsas para compra y taparoscas.

c) Polietileno de baja densidad (LDPE)

El polietileno es probablemente el polímero que más se ve en la vida diaria. Es el plástico más popular del mundo, presenta una densidad de 0.910 g/cm³. Éste es el polímero que hace las bolsas de almacén, contenedores para productos lácteos, frascos de champú, los juguetes de los niños, e incluso chalecos a prueba de balas. Por ser un material tan versátil, tiene una estructura muy simple, la más simple de todos los polímeros comerciales. Una molécula del polietileno no es nada más que una cadena larga de átomos de carbono, con dos átomos de hidrógeno unidos a cada átomo de carbono (Cervantes, *et al.* 2006; Platt, *et al.* 2005).

El polietileno de baja densidad es un polímero que se caracteriza por:

- Buena resistencia térmica y química.
- Buena resistencia al impacto.

- Es de color lechoso, puede llegar a ser transparente dependiendo de su espesor.
- Muy buena procesabilidad, es decir, se puede procesar por los métodos de conformados empleados para los termoplásticos, como inyección y extrusión.
- Es más flexible que el polietileno de alta densidad.
- Presenta dificultades para imprimir, pintar o pegar sobre él.

Cloruro de polivinilo (PVC)

El plástico de PVC, comúnmente conocido como vinilo, está compuesto de al menos un 50% de cloro. Los riesgos de toxicidad del ciclo de vida del PVC desde su fabricación, uso y eliminación llevan a muchos considerarlo el peor plástico desde una perspectiva de la salud ambiental. La multitud de aditivos utilizados para hacer PVC, lo hacen casi imposible reciclar para el consumo ó para la elaboración de nuevos productos (Platt *et al.* 2005).

5.2.2 Fibras de madera

Los residuos de madera son adecuados como material de relleno para la poliolefina y el uso de estos residuos reduce los costos de eliminación (Maiti, y Singh 1986; Mohanty, *et al.* 2001). Según Magín (2001), las fibras de madera son rendimiento del producto principal en aserraderos, puede ser tan bajo como el 20% del registro y el resto son pérdidas.

En el año 2002, Estados Unidos generaba cerca de 63 millones de toneladas de residuos de madera, de los cuales un 40% fue destinado a vertederos (Falk y Mckeever, 2004). La fibra de madera usada era de coníferas de pino principalmente, cuya partícula en longitud era 75-125µm. La madera de pino es muy popular en América del Norte y se encuentra en forma de polvo fino. Las fibras de coníferas son más largas que la madera de latifoliadas y la estructura es menos compleja (Stokke, 2003; English *et al.* 1996).

5.2.3 Agentes modificantes de los WPC

Agente de acoplamiento

Cuando se mezclan polímeros con otros componentes, sean rellenos u otros polímeros no compatibles, en la mayoría de los casos se producen fuerzas de repulsión que provocarán una pobre o nula adhesión. Para aumentar la adhesión entre el sistema polimérico y un relleno se pueden utilizar agentes de acoplamiento o compatibilizante. Estos compatibilizantes mejoran la interacción entre la matriz y el relleno. Además, la adición de compatibilizantes produce una dispersión más fina del relleno en la matriz, y morfologías más regulares y estables. Los agentes de acoplamiento pueden ser reactivos o no reactivos. En el caso de que sean reactivos habrá interacciones químicas con los componentes de la mezcla, formando enlaces covalentes, reduciendo o eliminando completamente los efectos de repulsión entre los componentes de la mezcla (Lu *et al.* 2005; Harper y Wolcott, 2004; Semeralul *et al.* 2009).

Estos agentes de acoplamiento también se han prestado a la mejora de la compatibilidad de la fibra de madera con el polímero, proporcionando una interacción entre ambos. Se puede unir químicamente, ya sea a fibras de celulosa, o a un polímero, o puede ayudar a formar una especie de "aleación" uniforme entre dos o varios componentes poliméricos, normalmente no muy compatibles entre sí. Generalmente, estos agentes compatibilizadores mejoran físicamente las propiedades del material polimérico compuesto, su resistencia a la intemperie, y el rendimiento en general (Klyosov, 2007).

Aditivos

Se entiende por aditivo, aquella o aquellas sustancias que no modifican la estructura molecular propiamente dicha de la matriz polimérica, ya que permanecen físicamente dispersas sin perturbar la estructura química del polímero, tal como mencionan Mascia (1989) y Hummel (2002).

Uno de los aditivos más notables es la cera, que se utiliza para proporcionar productos terminados con resistencia a la penetración acuosa. En tableros de partículas y fibra, la cera de emulsión proporciona una excelente resistencia al agua y estabilidad dimensional. Estas propiedades de penetración de agua mejoradas son importantes para asegurar el éxito al

producto durante y después de la construcción. La repelencia al agua proporcionada por la cera no tiene ningún efecto sobre los cambios dimensionales o de adsorción de agua de materiales compuestos expuestos a las condiciones de equilibrio. Otros aditivos utilizados para productos de especialidad incluyen conservantes, retardadores de fuego, y resinas de impregnación (Youngquist, 1999). En general, los aditivos permiten reducir los costos de las materias primas y por lo tanto el costo del producto final (English *et al.* s/f)

Las propiedades físicas de un polímero pueden alterarse considerablemente mediante la incorporación de aditivos. Según su función principal se pueden clasificar en:

- Aditivos que facilitan las condiciones de procesado (estabilizantes, lubricantes, promotores de flujo)
- Modificadores de las propiedades mecánicas (plastificantes, cargas reforzantes)
- Aditivos que disminuyen el costo de las formulaciones
- Modificadores de las propiedades superficiales (agentes antiestáticos y antibloqueo)
- Modificadores de propiedades ópticas (pigmentos, colorantes)
- Aditivos antienviejamiento (antioxidantes, fotoestabilizantes, fungicidas)
- Otros (retardantes a la llama, agentes espumantes)

Por lo tanto, los aditivos deben ser eficientes en su función, estables bajo las condiciones de procesado y en las condiciones de servicio y no afectar negativamente a las propiedades del polímero (García, 2004).

Lubricantes

Los lubricantes mejoran la homogeneización de fusión, la viscosidad, la calidad de la superficie y la salida de la extrusora durante el procesamiento de formación de compuestos y facilita la capacidad de deslizamiento en húmedo y la pared entre las masas fundidas de la extrusora. En general, la adición de lubricantes mejora el proceso de extrusión y las propiedades mecánicas de los productos de WPC (Lu *et al.* 2005; Harper y Wolcott, 2004).

Estabilizantes UV

El uso de estabilizadores ultravioleta (UV) comerciales son efectivos en la retención del brillo y el color, han sido usados ampliamente en la industria del plástico para aplicaciones exteriores para dar protección y combatir la degradación de los compuestos plásticos.

5.3 Otras láminas compuestas de sustancias inorgánicas

5.3.1 Láminas de fibrocemento

El fibrocemento es un material utilizado en la construcción, constituido por una mezcla de fibras de celulosa y sílice a las que se les adiciona un aglomerante inorgánico hidráulico (cemento) y agua, para formarse mediante fraguado y compresión simultanea (Mariscal, 2001).

La fabricación de placas de fibrocemento fue cambiando con el correr de los años, al principio se utilizaba asbesto como fibra, pero cuando se pudo comprobar que este material provocaba daños a la salud, se fue abandonando paulatinamente en las diferentes naciones. Las características principales de las placas de fibrocemento son: fáciles de cortar y perforar, son también impermeables, se emplean como material de acabado de cubiertas, para el recubrimiento de exteriores, y para protección de factores climáticos como la lluvia. Su uso principal actual se orienta a la construcción de plafones, divisiones, entresijos y bases para techos al aplicarlas sobre perfiles de acero o madera. Como ventaja principal de este tipo de placas o láminas de fibrocemento, se tiene que es económico, y es por ello que se emplea en la construcción de almacenes, cobertizos y naves industriales; las placas diseñadas con este material pueden tener formas lisas y onduladas, sus longitudes varían dependiendo de la necesidad de cada usuario (Mariscal, 2001).

5.3.2 Láminas de fibra de vidrio

La fibra de vidrio es un material que consta de numerosas fibras finas de vidrio. En ambientes ácidos y corrosivos, las placas de fibra de vidrio, proporcionan un alto nivel de resistencia a la corrosión, aun comparado con el acero inoxidable. Adicionalmente, la resistencia de las placas, es evidenciada por su habilidad para soportar cargas pesadas. Para cubrir una amplia gama de necesidades, las placas de fibra de vidrio son fabricadas en espesores de 1/8" hasta

3/4" y son fáciles de instalar, con mínima cantidad de desperdicios (Morales, 2008; y Mariano, 2011).

Hoy en día los plásticos reforzados con fibra de vidrio son usados en muchas aplicaciones; en donde se reemplazan con ventaja a la madera, el aluminio y el acero, dado su gran versatilidad. Algunas de las principales características de los productos de fibra de vidrio son sus elevadas propiedades mecánicas, bajo peso específico, alta rigidez dieléctrica, flexibilidad de diseño, resistencia a la corrosión y bajo costo de mantenimiento (Morales, 2008; y Mariano, 2011)

5.3.3 Láminas de poliuretano y Láminas de poliestireno

Son un sistema tipo “Sandwich” constituidos por dos láminas de acero galvanizado, aluminio y/o polipropileno hidrolavable; y en su interior inyectado con poliuretano de alta densidad. Este tipo de placas garantiza un bajo flujo de calor, ofreciendo un comportamiento confiable en todos los climas y condiciones atmosféricas, porque conserva la temperatura estable al interior, esto lo hace ideal para: techos/cubiertas, fachadas y muros divisorios, campamentos y construcciones provisionales o permanentes, entre otras aplicaciones.

5.4 Métodos de conformado de los WPC

Existen varias técnicas para dar forma a los WPC. Algunas de las más comunes son:

5.4.1 Extrusión

La extrusión es la técnica más utilizada para fabricar perfiles compuestos, esto sucede por medio de una mezcla física, que en combinación con agentes de acoplamiento puede formar algunos enlaces químicos o formar emulsiones de forma que el material sea estable (Lu *et al.* 2000; Gardner y Murdock, s/f).

La extrusión consiste en hacer pasar bajo la acción de la presión un material termoplástico a través de un orificio con forma más o menos compleja, de manera tal, y continua, que el material adquiera una sección transversal igual a la del orificio. En la extrusión de termoplásticos el proceso no es tan simple, ya que durante el mismo, el polímero se funde dentro de un cilindro y posteriormente, es enfriado en una calandria (figura 5.1).

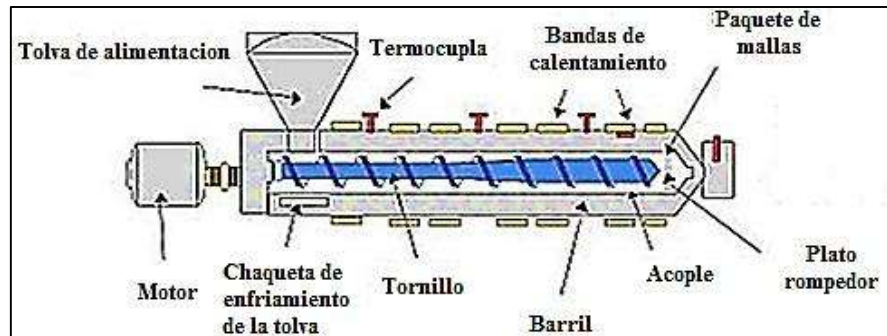


Fig. 5.1. Diagrama de extrusión de los WPC (Mariano, 2011).

La extrusión puede ocurrir en un equipo de:

- Doble husillo
- Husillo sencillo

La rapidez con que el husillo gira determina la tasa de material extruido por minuto, esta tasa de material extruido puede incrementarse con agentes de flujo, agentes de acoplamiento y espumantes (Bledzki y Faruk, 2006).

5.4.2 Inyección

La inyección de termoplásticos es un proceso físico y reversible, en el que se funde una materia prima llamada termoplástica, por el efecto del calor, en una máquina llamada inyectora. Esta máquina con el termoplástico en estado fundido, lo inyecta, dentro de las cavidades huecas de un molde, con una determinada presión, velocidad y temperatura. Transcurrido un cierto tiempo, el plástico fundido en el molde, va perdiendo su calor y volviéndose sólido, copiando las formas de las partes huecas del molde donde ha estado alojado. El resultado es un trozo de plástico sólido, pero con las formas y dimensiones similares a las partes huecas del molde (figura 5.2).

La temperatura del molde puede mantenerse un poco más elevada que en la inyección tradicional debido a que la madera en el compuesto permite una estabilidad dimensional mejor que el simple polímero, por ello un enfriamiento menos intensivo resulta en un ahorro de tiempo y costos (Mariano, 2012).

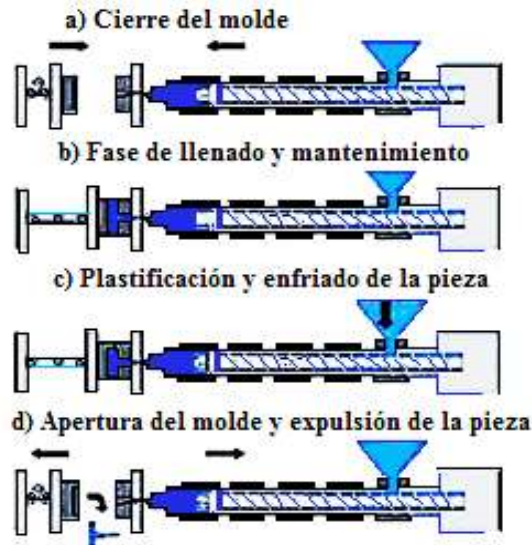


Fig. 5.2. Proceso de inyección del WPC (Mariano, 2011).

5.4.3 Moldeo por compresión

El moldeo por compresión es el método más difundido para la producción de compuestos de madera y plástico. Figura 5.3, en esta técnica se utiliza comúnmente fibras naturales (yute o henequén) además de la harina de madera (Mariano, 2012).

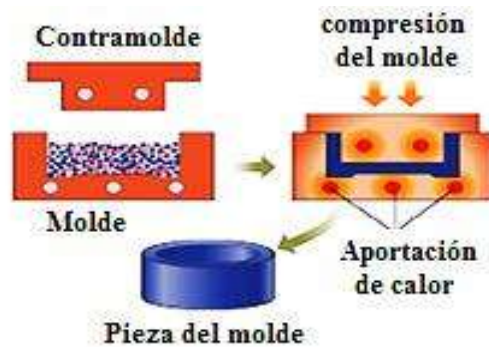


Fig. 5.3. Moldeo por compresión del WPC (Mariano, 2011).

El moldeo por compresión es un método en el que el material precalentado, es colocado en la cavidad del molde abierto. El molde se cierra, se aplica calor y presión para forzar al material a entrar en contacto entre los moldes para obtener la forma deseable de materiales fundidos a través de la solidificación. Podría obtenerse entre el flujo de material y las propiedades mecánicas un proceso de buena optimización (Tornqvist *et al.* 1998)

5.5 Usos de los WPC

El WPC puede utilizarse para decoración y extensamente en la construcción, pasamanos de escalera, tableros de suelo, para adornar cocinas y habitaciones. Una de las principales aplicaciones de este tipo de materiales se encuentra en el recubrimiento de superficies que se encuentran a la intemperie, siendo ampliamente utilizados en muelles, terrazas, y otras superficies cerca de piscinas o en centros de recreación. Las ventajas inherentes para estas aplicaciones radican en una mayor resistencia a la humedad y a los insectos, unido a un bajo nivel de mantenimiento. En general, los WPC permiten construir infraestructuras de prolongada vida útil o de mayor duración donde la infraestructura fabricada actualmente en madera sin tratar no lo puede hacer. Así mismo, tiene un impacto positivo para el medioambiente, ya que permite disminuir el uso intensivo que actualmente sufre el bosque nativo.

6. MATERIALES Y METODOS

6.1 Material experimental

El compuesto mixto utilizado en esta investigación, fue una lámina elaborada con una matriz plástica de polietileno de baja densidad y como relleno se empleó madera de pino, las láminas fueron elaboradas por la industria ECOLAMINADOS S.A de C.V, ubicada en la ciudad de Morelia, Michoacán, México. Se procedió de la siguiente manera: Se pulverizó aserrín de pino proveniente de aserraderos cercanos a la industria. Se obtuvo un polvo fino el cual evita que el polímero de baja densidad (LDPE) se queme y pierda sus propiedades. A la mezcla de componentes, se le agregó una serie de aditivos y pigmentos, los cuales actúan como agentes de acople, endurecido, impermeabilizante y colorante.

Una referencia rápida del proceso de elaboración de la lámina compuesta a base de madera y plástico se presenta en la Figura 6.1.

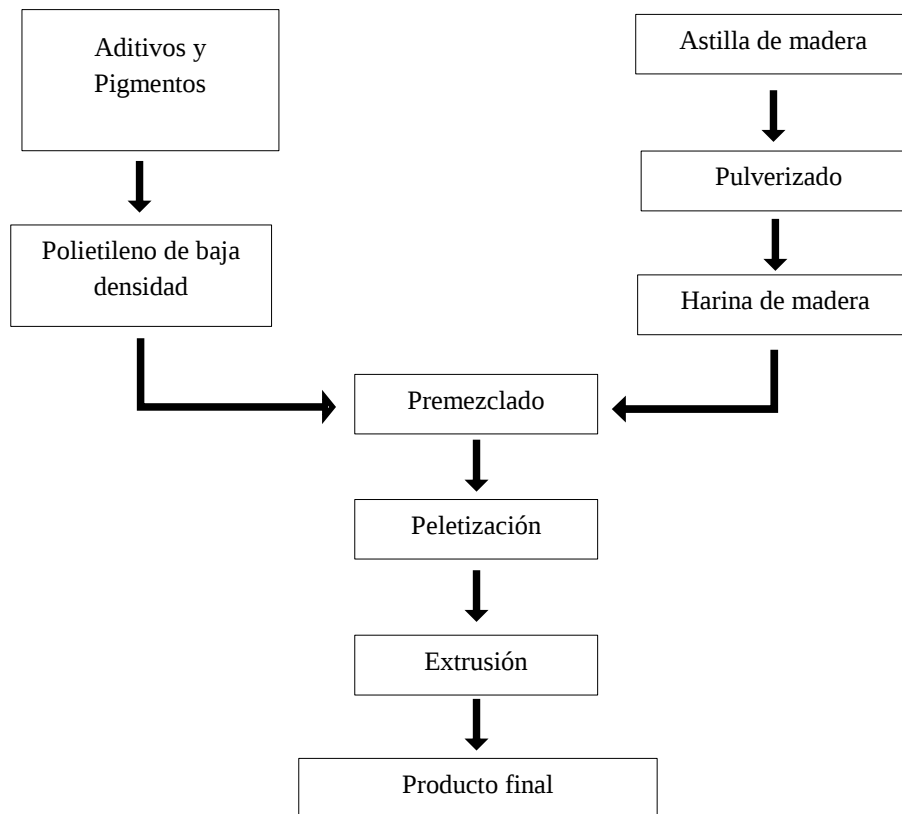


Fig. 6.1. Diagrama de flujo para la elaboración de la lámina acanalada de madera-plástico (LMP).

Después de mezclar todos los componentes, estos fueron llevados a un proceso de peletización, para homogenizar la mezcla, además de darle mayor fluidez para moldearlas.

Todos los componentes de las mezclas se llevaron a un extrusor de tornillo contrarotativo, equipado con 10 zonas de temperaturas y con un cabezal acanalado. Como producto final se obtienen láminas acanaladas cuyas dimensiones se presentan en el Cuadro 6.1, y que son usadas para sombreados y techumbres.

Cuadro 6.1. Dimensiones de las láminas de madera-plástico

DIMENSIONES (cm)	
Ancho total	64
Largo	162
Grosor	0.5

6.1.1 Maquinado de Probetas

Para el maquinado de las probetas, se utilizó una sierra circular de mesa Silverline ®, ubicada en el laboratorio de Procesamiento Mecánico de la Madera de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, dependiente de la UMSNH.

6.2 Evaluación física de la LMP y los materiales de referencia

Se realizaron ensayos utilizados, tanto en las industrias como en centros de investigaciones, para efectos de control de calidad, tales como: la determinación de la densidad, la dureza, la absorción de agua y el hinchamiento del espesor; además la resistencia a la extracción de tornillos.

Complementando los ensayos anteriores, se evaluaron las propiedades térmicas y comportamiento al fuego, así como también las propiedades acústicas y degradación de la LMP, como muestra la figura 6.2.

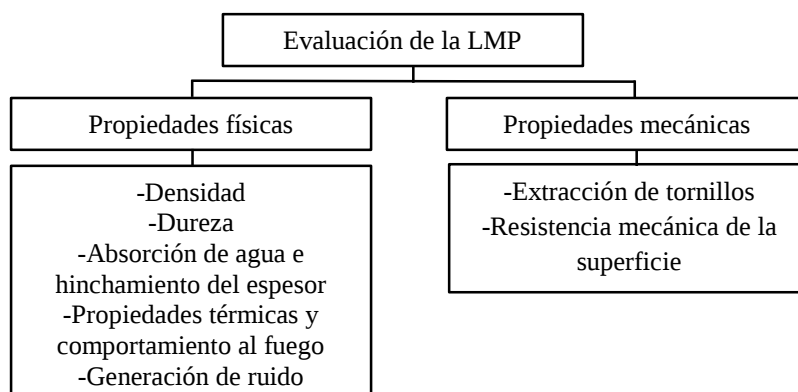


Fig. 6.2. Evaluación física y mecánica de la LMP y los materiales de referencia.

La evaluación de los materiales de referencia se realizó en proporción al espesor de la LMP, debido a que algunos materiales utilizados en los ensayos presentaron un espesor mayor a la LMP.

6.2.1 Determinación de la Densidad

La densidad es el cociente entre masa y volumen de un cuerpo. Para determinar la densidad de la LMP, se utilizó el principio de Arquímedes (Cuando el objeto se sumerge, además de su propio peso, sobre el cuerpo actúa el empuje del agua. Por tanto, al equilibrar la balanza, el valor de la lectura corresponde a la masa del cuerpo menos la masa del líquido que desaloja), debido a que la LMP presentó un volumen irregular que fue difícil de medir directamente.

El procedimiento fue el siguiente:

- Se determinó la masa de 15 probetas en una balanza digital. Las dimensiones fueron de 5x5x0.5 cm (figura 6.3).
- Se sumergió cada probeta en el vaso de precipitados con agua, se taró la balanza y se anotó la lectura correspondiente al volumen (figura 6.4).



Fig. 6.3. Determinación de masa de la LMP.



Fig. 6.4. Determinación del volumen de la LMP.

A fin de determinar la densidad del material se utilizó la fórmula siguiente:

$$\rho = m/v \quad (1)$$

Donde:

ρ = Densidad

m = Masa

v = Volumen

El valor de densidad se comparó, con los obtenidos por otras investigaciones para compuestos a base de madera y plástico.

6.2.2 Determinación de la dureza

Para la determinación de la dureza se utilizó un durómetro digital Phase II ®, ideal para determinar el valor de dureza de materiales plásticos con alta dureza, como el caucho duro, resina dura, vidrio orgánico, termoplásticos, acrílicos, etc. Este durómetro permitió obtener la dureza de forma directa expresada en escala Shore D (HD).

Procedimiento:

- Se dimensionaron 10 probetas de 5 cm x 10 cm por cada uno de los materiales a ensayar (WPC, OSB, Triplay, Fibra y MDF).
- Se colocó el durómetro sobre la superficie de cada uno de los materiales y se registraron 6 lecturas por ambas caras (figura 6.5).



Fig. 6.5. Determinación de la dureza de la LMP y materiales de referencia.

6.2.3 Hinchamiento del espesor y absorción de agua ASTM (D-1037)

a) Determinación del hinchamiento del espesor

La determinación del hinchamiento del espesor nos permitió evaluar el comportamiento del material plástico frente a las influencias del agua y humedad.

El procedimiento fue el siguiente:

1. Se obtuvo un total de 20 probetas de 5x5x0.5 cm. En la Figura 6.6, se esquematizan las probetas utilizadas para llevar a cabo los ensayos.

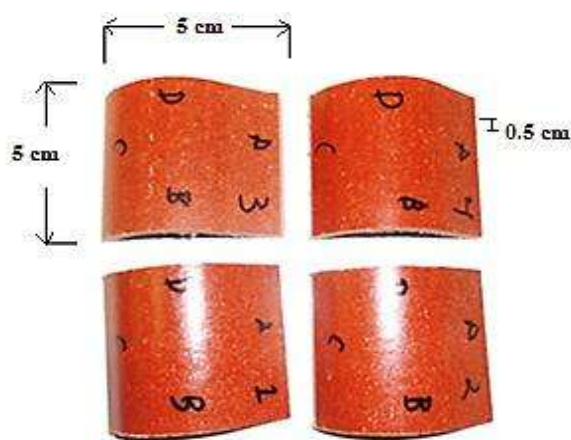


Fig. 6.6. Probetas utilizadas para los ensayos de hinchamiento del espesor y absorción de agua.

2. A cada probeta se le determinó el espesor en el mismo punto (figura 6.7) antes y después de una inmersión en agua, por periodos de 2, 4, 8, 24, 72 horas, 1 semana, 1 mes y 1 año (figura 6.8).



Fig. 6.7. Determinación del espesor de los ensayos.



Fig. 6.8. Ensayos de hinchamiento del espesor y absorción de agua.

El incremento del hinchamiento del espesor se obtuvo con la fórmula siguiente:

$$\%He = [(e_f - e_i)/e_i]100 \quad (2)$$

Donde:

%He= Porcentaje del hinchamiento del espesor

e_i = Espesor de la probeta antes de inmersión (mm)

e_f = Espesor de la probeta después de inmersión (mm)

b) Determinación de absorción de agua.

La absorción de agua, es la diferencia de humedad de la pieza antes y después de ser sumergida en agua, expresada en porcentaje.

El procedimiento fue el siguiente:

1. Se obtuvo un total de 20 probetas de 5x5x0.5 cm. En la Figura 6.8, se muestran las probetas utilizadas para llevar a cabo los ensayos.
2. A cada probeta se le determinó el peso (figura 6.3) antes y después de una inmersión en agua por periodos de 2, 4, 8, 24, 72 horas, 1 semana, 1 mes y 1 año. Este ensayo de absorción de agua se efectuó a temperatura y presión ambiente (figura 6.8).

La determinación de absorción de agua, se obtuvo tomando en cuenta las diferencias de peso de cada probeta ensayada. Esto se logró con la siguiente fórmula:

$$\%A_b = [(P_2 - P_1)/P_1]100 \quad (3)$$

Donde:

%A_b = Porcentaje de absorción de agua

P_1 = Peso de la probeta antes de la inmersión (g)

P_2 = Peso de la probeta después de la inmersión (g)

6.2.4 Pruebas de degradación por medio de tres ciclos de inmersión de agua y secado

Este método de ciclos de degradación se utilizó para obtener una medida de la capacidad inherente de compuesto madera-plástico para resistir a severas condiciones de exposición.

Para llevar a cabo esta prueba se empleó la Norma JAS (Japanese Agricultural Standard Association) 2000.

Los ensayos de las láminas fueron comparados con diferentes tableros de referencia (OSB, Triplay, MDF y tablero de fibra) donde se evaluó la absorción de agua e hinchamiento del espesor, así como también la apariencia del material durante los tres ciclos utilizados.

El procedimiento que se siguió fue el siguiente:

1. Primeramente se realizó una inspección visual inicial de 4 muestras del material, antes de la inmersión en agua. Las dimensiones fueron de 5x5x0.5 cm.
2. Se procedió a la inmersión en agua a 70°C durante dos horas en un equipo de termo baño Felisa ® (figura 6.9), seguido de un secado en horno Felisa ®, a 60°C durante tres horas (figura 6.10). Posteriormente se realizó la inspección visual correspondiente a esta etapa.



Fig. 6.9. Inmersión en agua de las probetas.



Fig. 6.10. Secado en estufa de las probetas.

3. Se procedió a un segundo ciclo de inmersión en agua y secado. Pero esta vez la inmersión se realizó durante 4 horas a 80°C, seguido de un secado a 60°C, durante 20 horas. Y se realizó la inspección correspondiente.

4. Finalmente el tercer ciclo consistió de una inmersión en agua durante 4 horas a 80°C, con un secado final de 3 horas a una temperatura de 60°C. Se realizó la inspección final de las muestras.

6.3 Evaluación térmica de la LMP y los materiales de referencia

6.3.1 Ensayo de resistencia al fuego

Dentro de este ensayo se realizó una comparativa del material plástico con madera sólida de pino.

Para la realización de este ensayo se empleó el equipo y accesorios especificados en la norma ASTM E69-99 (ASTM, 2001). En la Figura 6.11, se muestra el accesorio empleado durante esta prueba.

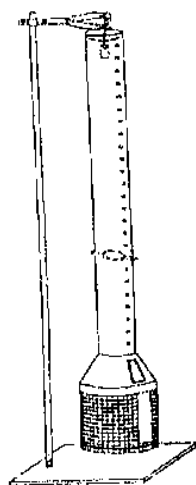


Fig. 6.11. Tubo de combustión (ASTM E69-99).

La norma propone dos procedimientos para efectuar el ensayo (A y B), dentro de esta investigación se utilizó el procedimiento B, donde solo se midió la pérdida de peso del material, al final de cada prueba realizada.

El procedimiento fue el siguiente:

1. Se obtuvieron probetas cuyas dimensiones fueron de 101.5 cm de largo x 2 cm de ancho x 0.5 cm de espesor. A cada una de las probetas se registró su peso inicial (figura 6.12).



Fig. 6.12. Registro del peso inicial en la prueba de combustión.

2. Las pruebas se llevaron a cabo en un cuarto libre de corrientes, donde se montó el equipo señalado por la norma.
3. Se procedió a ajustar el mechero de ignición, esto para que la flama adquiriera una tonalidad azul de aproximadamente 279 mm de altura.
4. Se colocó el mechero dentro del tubo de fuego. Luego se reguló la flama durante 1 minuto, para producir una temperatura constante de $180 \pm 5^{\circ}\text{C}$ en la parte superior del tubo de fuego (figura 6.13).



Fig. 6.13. Verificación de temperatura en el tubo de fuego.



Fig. 6.14. Ensayos de pruebas de combustión.

5. Alcanzadas las condiciones señaladas por la norma, se prosiguió a la exposición de cada una de las muestras a ensayar, dentro del tubo de combustión (figura 6.14), luego se introdujo la flama del mechero estabilizada y centrada sobre la muestra, debajo del tubo hasta un tope de 25 mm, durante 4 minutos. Transcurrido este tiempo se retiró el mechero del tubo de fuego bajando la intensidad de la flama.

6. Por último, se transfirió la muestra ensayada a la balanza digital, esto para registrar el peso final de cada una de las muestras (figura 6.15).



Fig. 6.15. Registro del peso final en la prueba de combustión.

Para calcular el porcentaje de la pérdida del peso se utilizó la siguiente fórmula:

$$\%P_p = [(P_i - P_f)/P_i]100 \quad (4)$$

Dónde:

$\%P_p$ = Porcentaje de pérdida de peso

P_i = Peso inicial (g)

P_f = Peso final (g)

6.3.2 Pruebas de comportamiento al fuego

Normalmente para evaluar las propiedades térmicas y resistencia al fuego, a nivel internacional, se utilizan las normas ASTM E-119 y ASTM E-84, sin embargo, por ser sumamente costosa y no contar en el país con laboratorios que puedan realizarlas, se usó un quemador múltiple utilizado por Espinoza (2002), capaz de evaluar 3 piezas a la vez, de forma económica y confiable, tratando de cubrir los aspectos evaluados por las normas anteriores. El quemador tiene claros de soporte de 20 cm, de acero redondo y liso para evitar fricción en las piezas, además tiene guías para la aplicación de carga durante los ensayos que así lo requieran. El quemador se puede apreciar en la Figura 6.16.



Fig. 6.16. Quemador múltiple para pruebas térmicas y de resistencia al fuego.

Para la generación de la flama en las pruebas realizadas se utilizaron mecheros “bunsen”, donde la temperatura alcanzada depende ampliamente de las propiedades combustibles del gas utilizado y del diseño del propio mechero, por lo que la temperatura alcanzada por el tipo de mechero fue superior a los 300 °C. Las pruebas realizadas fueron las siguientes:

1. Pruebas de conductividad térmica, por medio de materiales altamente inflamables.

Se colocaron fósforos como materiales de alta inflamabilidad en la cara superior del tablero que no estuvo expuesta al fuego, se midió la cantidad de tiempo que se requirió para iniciar la combustión (figuras 6.17 y 6.18). Las probetas para este ensayo fueron de 25 cm de largo x 25 cm ancho x 0.5 cm de espesor.

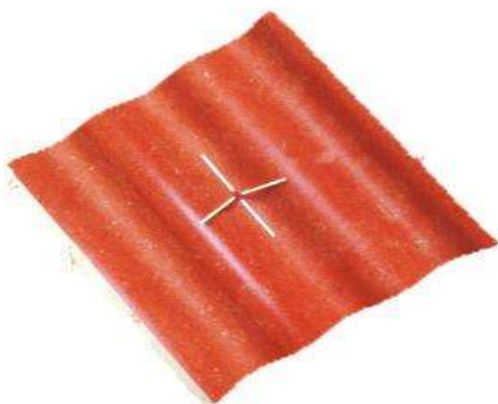


Fig. 6.17. Colocación de fósforos, en la prueba de conductividad térmica.



Fig. 6.18. Ensayo de conductividad térmica, cuando se alcanza la temperatura de ignición.

2. **Medición de la conductividad térmica por medio de termopar.** Se colocó un sensor de temperatura en la cara opuesta de la probeta, al contacto del fuego, tomando lecturas de 10 probetas mediante un termómetro digital Traceable ® (figura 6.19 y 6.20), durante un periodo predeterminado de 15 minutos (el tiempo puede ser menor si la probeta se perfora o se destruye).

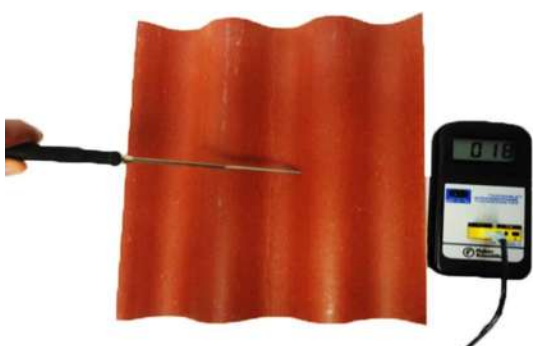


Fig. 6.19. Colocación del sensor y medición de la transmisión de calor a través de la lámina por medio de termopar.



Fig. 6.20. Condiciones alcanzadas durante la prueba de conductividad térmica por medio de termopar.

3. **Prueba de capacidad de carga.** Se determinó la capacidad de las probetas para soportar una carga de 2.5 kg proveniente de dos barras de hierro, bajo la acción del fuego, evaluando el tiempo requerido para vencer la pieza (figuras 6.21 y 6.22). Se utilizaron probetas de 25 cm de largo x 5 de ancho y 0.5 de espesor.



Fig. 6.21. Probeta soportando 2.5 kg bajo la acción del fuego.



Fig. 6.22. Probeta vencida por el fuego y la carga.

6.4 Evaluación de las propiedades acústicas de la LMP y los materiales de referencia

Dentro de esta prueba se determinó la generación de ruido mediante balines metálicos en la LMP, lámina de asbesto y lámina de fibra de vidrio, simulando la generación de ruido por lluvia en los techos.

Procedimiento:

- Se dimensionaron 5 probetas de WPC, 5 probetas de lámina de asbesto y otras 5 de lámina de fibra de vidrio. Las dimensiones fueron de 25x25 cm x el espesor de cada material en (mm).
- Para determinar el nivel de ruido expresado en decibeles (dB), se empleó un medidor digital Traceable[®] (figura 6.23).



Fig. 6.23. Medidor digital de nivel de sonido.

- Se emplearon balines de diámetro 0.3 cm, esto para simular la lluvia o granizo.
- Finalmente los balines se dejaron caer a diferentes alturas (50, 150, 300, 500 cm), sobre cada una de las probetas (figura 6.24).

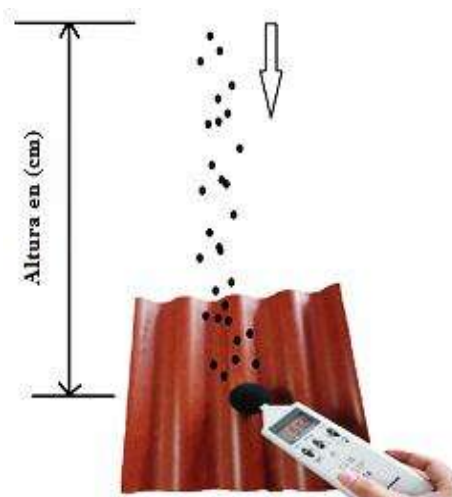


Fig. 6.24. Determinación de ruido de la LMP y los materiales de referencia.

6.5 Evaluación mecánica de la LMP y los materiales de referencia

6.5.1 Ensayo de extracción de tornillos

Este ensayo se realizó de acuerdo a la metodología propuesta en la norma ASTM (D 1037). El objetivo de esta prueba fue medir la fuerza necesaria para extraer un tornillo de la madera plástica. Se usó una máquina universal Shimadzu ® (figura 6.25), con capacidad de 10,000 kg, ubicada en el laboratorio de Física y Mecánica de la Madera de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, dependiente de la UMSNH.

El procedimiento consistió en dimensionar 15 probetas de 5x5x0.5 cm de la LMP y los materiales de referencia. Posteriormente las probetas fueron perforadas en una cara con una broca de 2 (mm). Se utilizaron tornillos galvanizados del No. 10 de cabeza fijadora, con medidas de 1 1/2" (10x38 mm). Los tornillos fueron instalados en las perforaciones con un desarmador hasta una profundidad aproximada de 10 (mm). Para la realización del ensayo se empleó un dispositivo especial que opera en la máquina universal de ensayos según la Figura 6.26. La velocidad de carga aplicada por la maquina fue de 3 mm/min.



Fig. 6.25. Máquina universal Shimadzu ®.

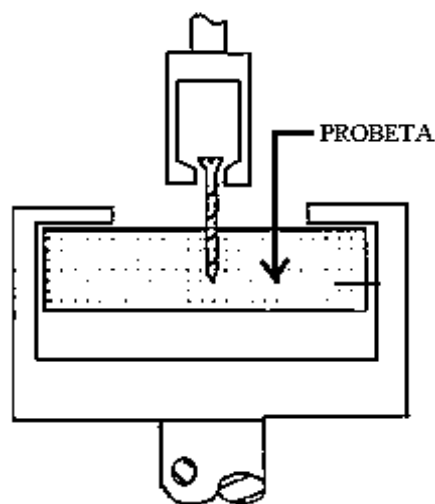


Fig. 6.26. Esquema del ensayo de extracción de tornillos.

6.6 Evaluación de la resistencia mecánica de la superficie en la LMP

Este ensayo se realizó con el objeto de medir la fuerza o carga necesaria para romper la LMP mediante una máquina universal.

Dentro de este ensayo se usaron ciclos de degradación para el material plástico, con la finalidad de observar el comportamiento de resistencia, antes y después de aplicar los ciclos.

Procedimiento:

- a) Se ensayaron 7 probetas del material plástico, y otras 7 de la lámina de asbesto, con el objeto de realizar una comparativa en resistencia entre ambos materiales. Las dimensiones fueron de 30*30 cm x el espesor.
- b) Se elaboró un accesorio cuyo claro fue de 900 cm² (figura 6.27). El cual permitió sostener las piezas a la hora de aplicar la carga, proveniente de una máquina universal, la velocidad utilizada fue de 6 mm/min (figura 6.28).

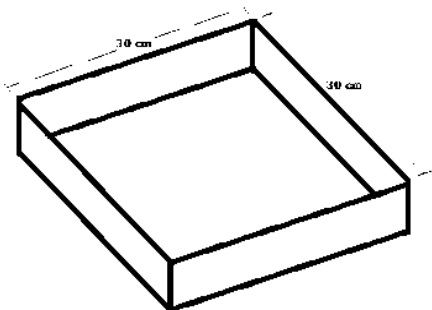


Fig. 6.27. Accesorio utilizado durante la resistencia a la carga.

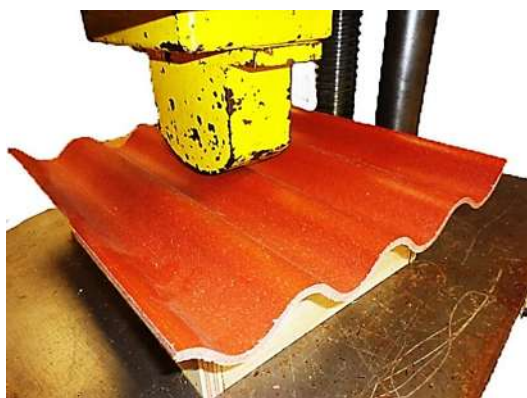


Fig. 6.28. Ensayo de resistencia a la carga.

6.7 Análisis estadístico

El análisis de resultados de basó en la estadística descriptiva, donde se utilizaron: promedios, la desviación estándar (Desv.Est.), el coeficiente de variación (C. V.) y los valores máximos y mínimos, los cuales son los parámetros más utilizados para la interpretación de datos, de cada una de las propiedades estudiadas.

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Propiedades físicas

7.1.1 Densidad (ρ)

La densidad de la lámina compuesta de madera y plástico presentó valores que fluctúan en un intervalo de 1.07 a 1.32 g/cm³, con un valor promedio de 1.27 g/cm³ (cuadro 7.1), este valor es bastante alto al reportado por Youngquist (1999); París y Gonzales (2009); Klyosov (2007), para compuestos a base de madera-plástico.

Esta densidad alta 1.27 g/cm³, depende básicamente de la geometría de la madera, tamaño fino de las fibras y distribución de las células. Las fibras lignocelulósicas incrementan la dureza y rigidez del material compuesto siempre que la adhesión interfacial sea buena tal y como lo mencionan Bledzki y Faruk (2006); Stark y Rowlands (2003) y que influyen en las propiedades finales del producto, se encuentra en el intervalo de clasificación de densidades de los materiales plásticos tal y como muestra la tabla del anexo II.

Cuadro 7.1. Resultados para la determinación de la densidad.

Variable	Promedio (g/cm ³)	Máximo (g/cm ³)	Mínimo (g/cm ³)	Desv. Est. (g/cm ³)	C. V. (%)
Densidad	1.27	1.32	1.07	0.06	4.7

7.1.2 Dureza

En el Cuadro 7.2, se muestran los valores de dureza para cada uno de los materiales ensayados. Se observa que la LMP es el material más duro presentando un valor de 69 HD, seguido del tablero de fibra con 65 HD, el MDF y OSB presentan la misma dureza de 57 HD, finalmente el material que presenta menor dureza es el triplay con un valor de 37 HD.

Cuadro 7.2. Determinación de la dureza de la LMP y los materiales de referencia, en unidades HD.

MATERIAL	Promedio (HD)	Máximo (HD)	Mínimo (HD)	Desv. Est. (HD)	C. V. (%)
LMP	69	76	63	3.1	5
Fibra	65	72	52	4.6	7
MDF	57	70	52	4.2	7
OSB	57	67	51	4.5	8
Triplay	37	49	27	4.3	12

De manera gráfica se puede observar en la Figura 7.1, la comparación de la dureza para los diferentes materiales ensayados.

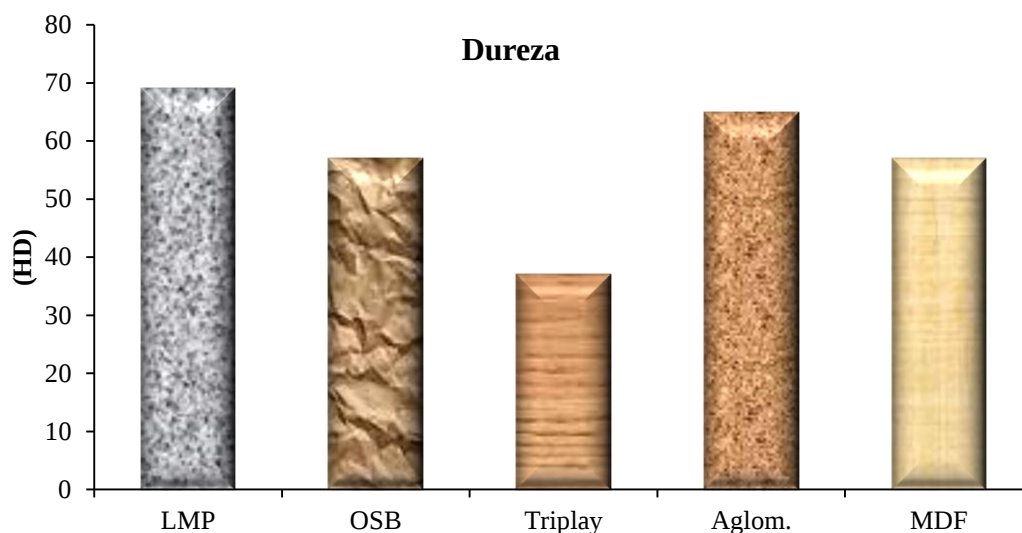


Fig. 7.1. Comparación de la dureza (HD) de la LMP, con los materiales de referencia.

7.1.3 Hinchamiento del espesor

En el Cuadro 7.3, se presentan los resultados del hinchamiento del espesor de los compuestos sometidos a inmersión en agua durante periodos de 2, 4, 8, 24, 72 horas, 1 semana, 1 mes y 1 año. Siendo de mayor consideración para este análisis, el hinchamiento máximo por un año de inmersión en agua.

Cuadro 7.3. Resultados del hinchamiento del espesor de la LMP (%).

Periodos	2 h	4 h	8 h	24 h	72 h	1 Semana	1 Mes	1 año
Promedio	0	0	0	0	0	1	3	12
Máximo	0	0	0	0	0	2.4	6.8	21.4
Mínimo	0	0	0	0	0	0	0	6.7
Desv. Est.	0	0	0	0	0	1.1	1.6	2.5
C. V.	0	0	0	0	0	130.9	55.7	20.5

El intervalo en el cual estuvieron los valores de hinchamiento mínimo y máximo a un año fue entre 6.7% y 21.4%, y con una C.V. de 20.5%. Esto permite concluir que las láminas acanaladas hechas de madera plástico logran incrementar su dimensión en espesor, a una inmersión por un año, en un 12% de su espesor inicial.

Al observar la comparación del hinchamiento de la LMP, con los obtenidos por Espinoza (2002) para diferentes materiales de construcción, se encontró que la LMP presenta una muy alta estabilidad dimensional al no presentar hinchamiento de espesor a 2 horas ni a 24 horas, superando a los demás materiales que presentan incremento diferente de espesor a 2 a 24 horas (anexo III).

7.1.4 Análisis de la absorción de agua

Respecto a este ensayo, se obtuvo que para la absorción por un año de inmersión en agua se generaron valores de absorción que fluctuaron entre el intervalo de 3.11 % como mínima y 13.48 % como máxima. De esto se pudo obtener que ante la absorción máxima, las láminas acanaladas hechas de madera plástico incrementan su peso en aproximadamente un 10.43%. Lo anterior se presenta en la Cuadro 7.4, que resume los valores obtenidos para la absorción de agua por periodos de 2, 4, 8, 24, 72 horas, 1 semana, 1 mes y 1 año.

Cuadro 7.4. Ensayo de absorción de agua de la LMP (%).

Periodos	2 h	4 h	8 h	24 h	72 h	1 Semana	1 Mes	1 año
Promedio	0	0	0	0	0.02	0.56	0.69	7.77
Máximo	0	0	0	0	0.06	0.74	0.92	13.48
Mínimo	0	0	0	0	0	0	0.18	3.11
Desv. Est.	0	0	0	0	0.03	0.16	0.21	3.09
C. V.	0	0	0	0	177.8	29.53	30.38	39.75

Al evaluar a 2 y 24 horas la LMP no presenta absorción de agua, a las 72 horas sigue patrones definidos siendo los siguientes: en la primer semana de inmersión en agua hay un aumento de peso de 0.56%, al mes incrementa en un 0.69%, mientras que al año presenta proporcionalmente un incremento de 7.77%. Por lo tanto, la absorción de agua es muy baja en la LMP, esto al compararlos con los valores mencionados por Klyosov (2007), quien indica que los WPC al ser sumergidos en el agua, absorben típicamente entre 0.7 y 3% de agua después de 24 h de la inmersión y cuando se sumergen en agua durante mucho tiempo, absorben hasta un 20-30% de agua.

Por otra parte, al comparar con resultados obtenidos por Espinoza (2002), se encontró que la LMP presenta un comportamiento al agua superior a otros materiales utilizados en la industria de construcción (anexo IV).

7.1.5 Análisis de degradación por medio de tres ciclos de inmersión en agua

Se realizó una inspección inicial y final de los materiales utilizados dentro de esta prueba tal y como se muestra en la Figura 7.2 y 7.3. Se observó que la LMP es el único material que no sufrió cambios físicamente, a comparación con el MDF que prácticamente sufrió una degradación total en toda su superficie, el tablero de fibra muestra severos daños y degradación considerable, el tablero contrachapado presenta solo grietas superficiales en la mayoría de las caras. Finalmente, el tablero OSB mostró solo desprendimiento de fibra de madera pero en general también tuvieron buena apariencia y no presentaron deformación alguna.

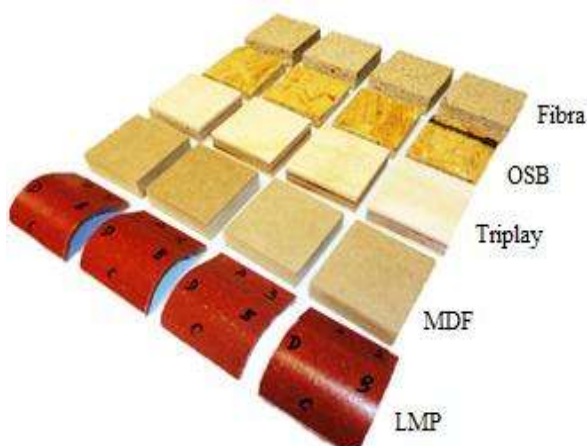


Fig. 7.2. Inspección inicial de las muestras.



Fig. 7.3. Inspección final de las muestras.

Por otra parte, los valores de absorción de agua presentados en los materiales durante este ensayo, se presentan en el Cuadro 7.5.

Cuadro 7.5. Valores de la absorción de agua durante la prueba de degradación (%).

Material	Absorción de agua (%)		
	N° de ciclos		
	Primero	Segundo	Tercero
LMP	-0.8	-1.5	-0.4
OSB	-5.6	-8.6	13.9
FIBRA	-5.9	-9.5	20.8
TRIPAY	-6.4	-9.4	0.2
MDF	-7.2	-14	76.7

Los resultados demuestran que la LMP es el material que mayor estabilidad tiene durante los tres ciclos, ya que no absorbió agua en ningún de ellos. Sin embargo, presenta pérdidas de material de -0.8% en el primero, -1.5% en el segundo y -0.4% en el tercero, seguido del tablero OSB que tiene pérdidas de material durante los dos primeros ciclos de -5.6% y -8.6% respectivamente y una absorción de agua de 13.9% en el tercer ciclo, por otro lado el MDF es el material que menor estabilidad dimensional tiene al ser el único que prácticamente se degradó durante los dos primeros ciclos, y absorbió un total de 76.7% de agua. Finalmente, el triplay y el tablero de fibra comparten una pérdida de material muy parecida en los dos primeros ciclos, sin embargo este último sufre degradación en toda su superficie en el tercer ciclo, mientras que el triplay solo absorbió un 0.2% de agua.

El hinchamiento presentado por los materiales durante la prueba de ciclos de degradación se presenta en el Cuadro 7.6.

Cuadro 7.6. Valores del hinchamiento del espesor durante la prueba de degradación (%).

Hinchamiento del espesor (%)			
Material	Nº de ciclos		
	Primero	Segundo	Tercero
LMP	0	0	0
TRIPAY	0.2	0	2.1
OSB	10.7	13.1	17.4
FIBRA	15.7	19.0	19.7
MDF	55.2	65.8	96.9

Al comparar el comportamiento del hinchamiento del espesor para cada uno de los materiales de referencia con la LMP, se obtiene que este último es el único material que presenta una estabilidad dimensional mayor en toda su superficie al no presentar hinchamiento alguno, seguido del triplay que solo incrementó su espesor durante el primer y tercer periodo en un 0.2% y 2.1%. Por otro lado el material menos estable durante este ensayo fue el tablero MDF al presentar hinchamiento del espesor bastante alto de 55.2% en el primer ciclo, 65.8% en el segundo y 96.9% en el tercero, seguido del tablero de fibra que sigue patrones definidos en cada ciclo de 15.7%, 19.0% y 19.7%, mientras que el tablero OSB incrementa su espesor en un 10.7% durante el primer ciclo, en el segundo de 13.1% y finalmente en el tercer ciclo las fibras de madera de este tablero se saturaron de agua incrementando su espesor en un 17.4%.

7.2 Análisis de las propiedades térmicas y resistencia al fuego

7.2.1 Método de inflamabilidad

Considerando los valores de peso inicial y peso final, tiempo que tarda la flama en apagarse desprendimiento de humos y brasa, se encontró que la pérdida de peso del material plástico fue de 76.9 %, mientras que la pérdida de peso de la madera solida de pino fue de 83.58 % (cuadro 7.7).

Cuadro 7.7. Resultados de los ensayos de combustión de la LMP y el material de referencia.

Material		Tiempo en apagarse (min)	Desprendimiento de humos y brasas (min)	Pérdida de peso (%)
LMP	Promedio	11.2	2.2	76.9
	Máximo	12.6	3.2	86.6
	Mínimo	9.6	1.2	68.1
	Desv. Est.	12	0.7	7.5
	C.V.	10.5	29.4	9.7
Madera	Promedio	4.6	3.3	83.6
	Máximo	5.2	5.4	88.3
	Mínimo	4.1	2.4	81.9
	Desv. Est.	0.5	1.1	2.4
	C.V.	9.8	33.7	2.8

La LMP frente al material de referencia, fue el material que tardó más tiempo en apagarse, y generó desprendimiento de humo más rápido una vez retirado el mechero de combustión, por lo que puede atribuirse al plástico en su constitución.

Por otra parte, la Figura 7.4, muestra la comparación gráfica de la pérdida de peso de ambos materiales evaluados, donde se puede observar que la madera sólida de pino presenta una pérdida de peso mayor a la LMP. Esta comparativa indica que el compuesto plástico tiene menor pérdida de peso que la madera sólida, esto puede deberse a que la formulación del compuesto plástico presenta similares o mejoras en sus propiedades con la ayuda de determinados aditivos químicos, como los agentes acoplantes y plastificantes tal como menciona Youngquist *et al.* (1995), Rowell *et al.* (1998), Jayaraman y Bhattacharyya (2004), Lucchetta *et al.* (2006), Yeh *et al.* (2009).

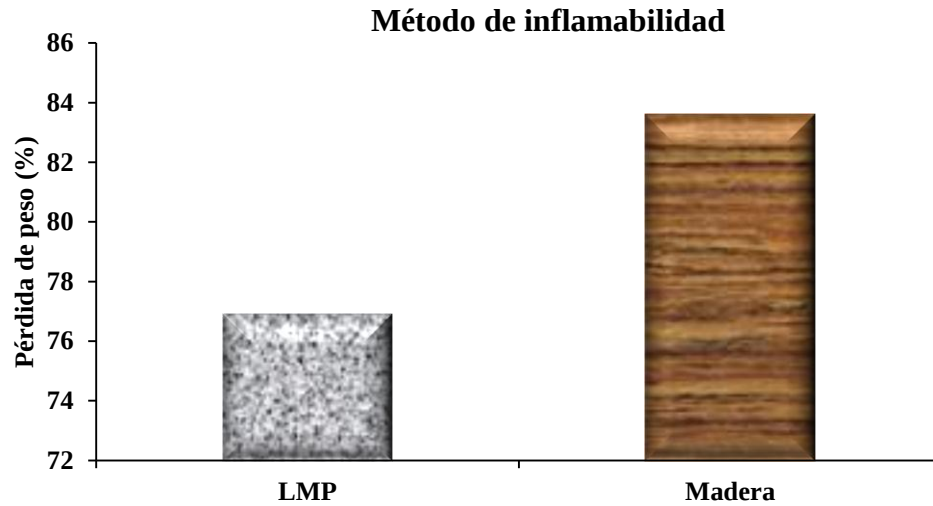


Fig. 7.4. Pérdida de peso de la LMP y el material de referencia.

De la misma manera para la madera, Reyes (2001) evaluó la madera mediante el mismo método de combustión con dos productos comerciales para retardar el fuego, obteniendo una pérdida de peso del 73.02 %, mientras que para una madera sin tratamiento obtuvo una mayor pérdida de 82.74%.

Por lo tanto se predice que la LMP presenta mejor comportamiento ante el fuego que la madera sin tratamiento, esto al tener una pérdida de peso menor, comparada con los resultados obtenidos por Reyes (2001).

7.2.2 Análisis de conductividad térmica mediante fósforos

En el Cuadro 7.8, se muestra que la LMP inicia la ignición del fósforo en un tiempo promedio de 03:58 min; mientras que el valor promedio para el material de referencia Asbesto fue de 01:28 min.

Cuadro 7.8. Tiempo de ignición del fosforo a través de la LMP y el material de referencia.

Material	Promedio (min)	Máximo (min)	Mínimo (min)	Desv. Est. (min)	C. V. (%)
LMP	03:58	04:46	03:32	0.01	8.94
Asbesto	01:28	01:31	01:19	0.01	12.95

Lo anterior queda planteado en la Figura 7.5, donde se puede observar que la LMP, fue el material con menos conductividad térmica, al presentar el periodo más largo para iniciar la

ignición del fosforo (03:58 min) valores similares fueron a los reportados por Espinoza (2002) para tableros de madera (anexo V).

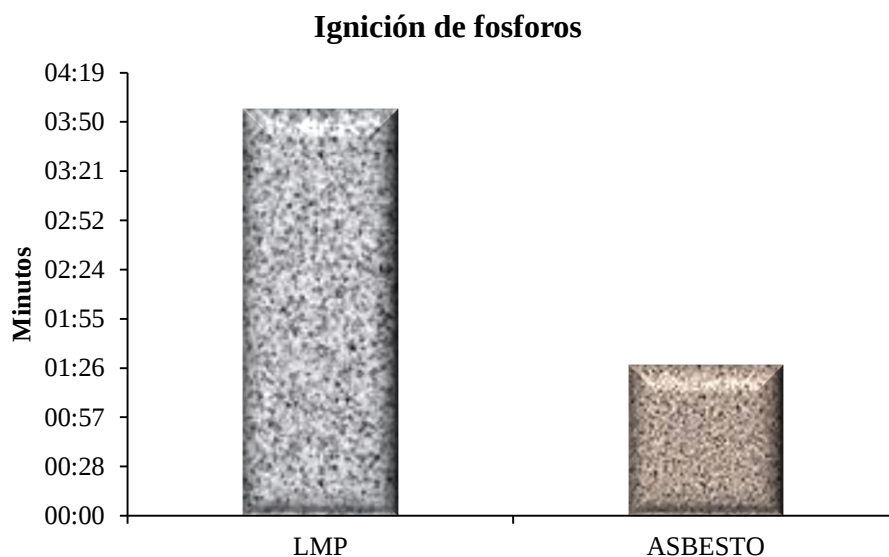


Fig. 7.5. Tiempo de ignición del fosforo a través de la LMP y los materiales de referencia.

Al comparar la conductividad térmica de la LMP y Lámina de Asbesto, se observa que este último tiene un conductividad mucho más alta que la LMP al presentar el tiempo más corto al iniciar la ignición del fosforo (01:28 min).

7.2.3 Análisis de conductividad térmica mediante termopar

La conductividad térmica de la LMP, se presenta de la manera siguiente: en los primeros minutos del ensayo ya sea a los 3 ó 5 minutos se presenta un rápido aumento de temperatura, de los 10 a los 13 min. baja el incremento de temperatura entrando en un periodo de semiestabilización y a los 15 minutos finalizó el ensayo para este material, debido al grado de deterioro de las probetas y que exponían al sensor del termopar a la flama directa, por lo tanto la máxima temperatura alcanzada, se registró en el periodo de 8 min. que fue de 277 °C (cuadro 7.9), al comparar estos valores con los reportados por Espinoza (2002) para diferentes materiales compuestos de madera (anexo VI). Se observa que la LMP presenta una conductividad térmica muy elevada después de los primeros 5 min.

Cuadro 7.9. Temperaturas (°C) registradas durante el ensayo de conductividad térmica de los materiales evaluados.

MINUTOS	0	3	5	8	10	13	15
LMP	22.2	193	249	277	264	265	--
Asbesto	19.4	321	>340	>340	>340	>340	>340

Lo anterior queda planteado en la siguiente Figura 7.6, donde se observa de manera gráfica el comportamiento de conductividad térmica que sufre cada material en relación al tiempo o periodos establecidos.

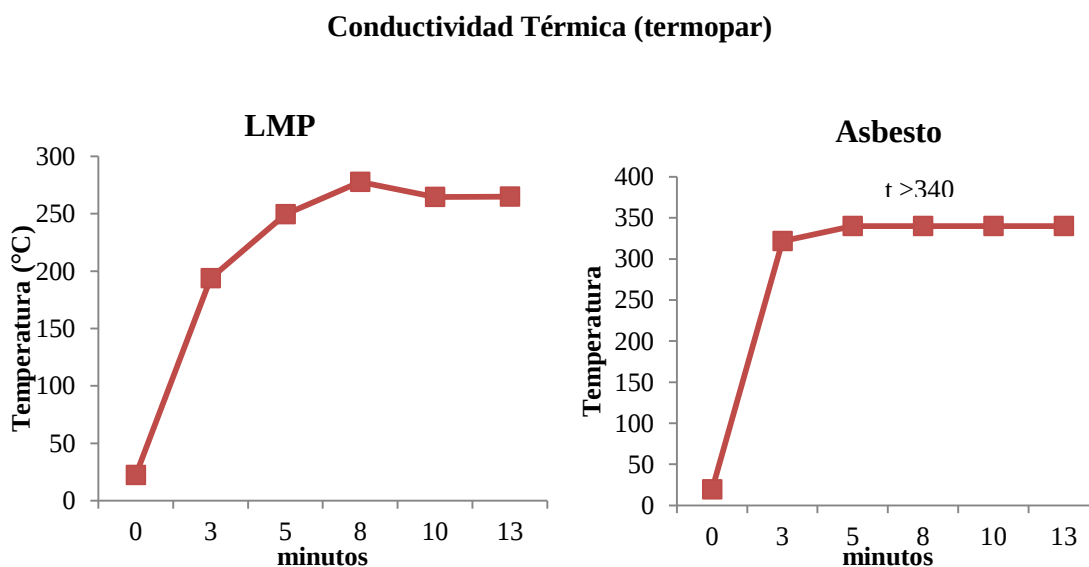


Fig. 7.6. Conductividad térmica mediante termopar a través de los materiales evaluados.

Se observa, que la lámina de Asbesto fue el material que más incrementó su temperatura en su fase inicial con 321 °C al evaluar a los 3 minutos y los 5 minutos ya no se registró temperatura, debido a que el termopar utilizado solo registraba valores entre un intervalo de 0 a 340 °C.

7.2.4 Análisis de aplicación de carga bajo el fuego

El periodo de resistencia más grande bajo la acción del fuego, lo presentó la lámina de Asbesto, obteniendo una tendencia favorable de resistencia en comparación con la LMP (cuadro 7.10).

Cuadro 7.10. Valores de resistencia de los materiales bajo la acción del fuego.

Material	Tiempo de resistencia				
	Promedio	Máximo	Mínimo	Desv. Est.	C. V.
LMP	1 min 11 s	01 min 45 s	01 min 01 s	0.0001	17.05 %
ASBESTO	1 h 43 min	1 h 52 min	1 h 31 min	0.01	8.37 %

En la Figura 7.7, al comparar la resistencia de la lámina de Asbesto con la LMP, al aplicar carga en presencia del fuego, este último fue el material que resistió por menos tiempo la carga (01:11 minutos), mientras que la lámina de Asbesto, fue el material con mayor resistencia a la carga con un tiempo de 1 hora 43 minutos, muy superior a la LMP y a los materiales reportados por Espinoza (2002) los cuales se presentan en el Anexo VII.

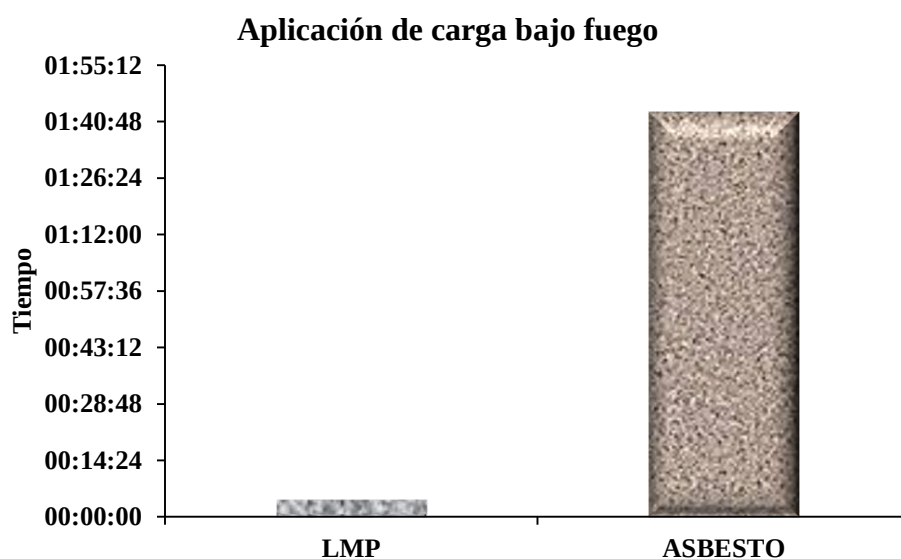


Fig. 7.7. Resistencia bajo la acción del fuego de la LMP y la lámina de Asbesto.

7.3 Propiedades acústicas de la LMP y los materiales de referencia

Con respecto al aislamiento acústico, la lámina de madera y plástico presenta grandes ventajas sobre los otros dos materiales. Su masa, con densidades de 1.07 kg/m^3 y 1.32 kg/m^3 , ofrece índices de reducción que superan los 62 dB a una altura de 500 cm. La cantidad de dB obtenidos durante el ensayo muestra una menor emisión de sonido para la LMP comparada con los materiales de referencia (cuadro 7.11).

Cuadro 7.11. Cantidad de sonido (dB) reflejado por los materiales a diferentes alturas.

Altura (cm)	50	100	300	500
LMP	46	48	53	62
Asbesto	48	52	54	65
Fibra de vidrio	53	54	59	74

Se observa que los tres materiales evaluados sigue patrones definidos, siendo la lámina de fibra de vidrio el material que generó más sonido en cada una de las alturas ensayadas, es decir a una altura de 50 cm generó un sonido de 53 dB, a 100 cm 54 dB, a 300 cm 59 dB y finalmente a una altura de 500 cm, presentó el valor más alto de 74 dB, este valor puede producir reacciones de estrés, cansancio y alteración del sueño (Así funciona, 2012).

Mientras que a una altura de 500 cm, la LMP presenta un valor 62 dB y la lámina de Asbesto de 65 dB, por lo que se considera un valor aceptable o tolerable a comparación con la fibra de vidrio, según Cuadro 1. Que muestra la clasificación de la intensidad del sonido en decibeles (dB) en diferentes entornos y ambientes y que fluctúa en un intervalo de 0 a 180 dB (así funciona, 2014).

En la Figura 7.8, se muestra el comportamiento del sonido generado por la LMP a diferentes alturas, así como también para los materiales de referencia.

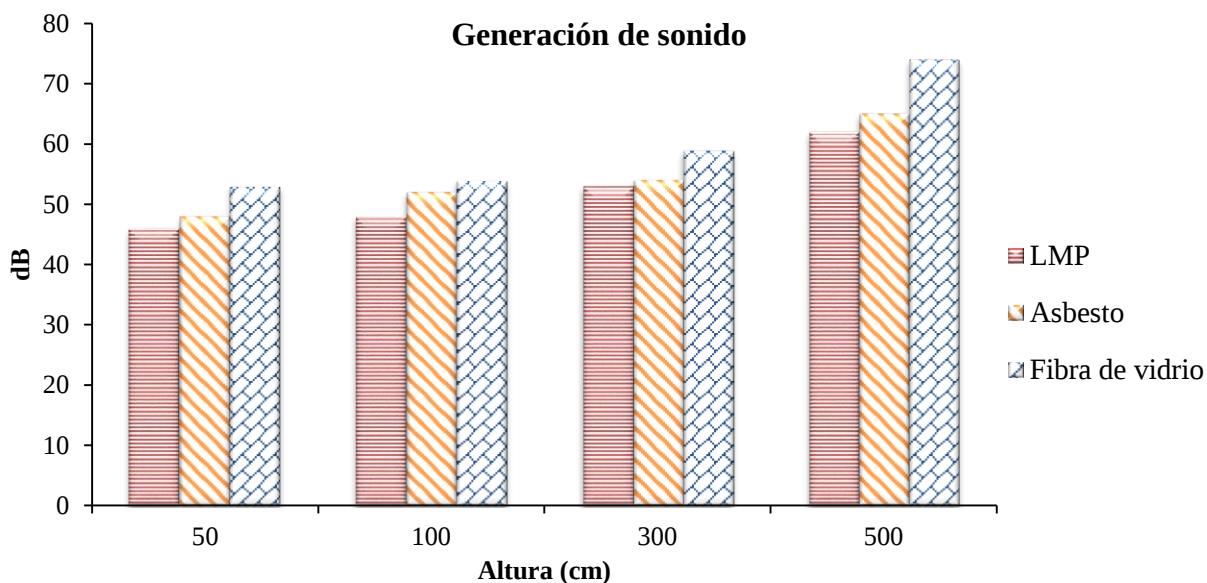


Fig. 7.8. Generación de ruido a diferentes alturas de la LMP y los materiales de referencia.

7.4 Propiedades mecánicas

7.4.1 Análisis de la resistencia a la extracción de tornillos

Los resultados completos de los ensayos de extracción de tornillos sobre la cara de la LMP y los materiales de referencia se presentan en el Cuadro 7.12, donde se observa que la LMP y el Triplay, presentaron los valores de resistencia a la extracción de tornillos más bajos, seguido del MDF con 54 kg; por otra parte el tablero OSB fue el material que más resistencia presenta con 85 Kg, seguido del aglomerado con 66 kg.

Cuadro 7.12. Resultados de la resistencia a la extracción de tornillos (kg).

MATERIAL	LMP	OSB	TRIPLAY	AGLOMERADO	MDF
Promedio	50	85	51	66	54
Máximo	55	139	67	69	57
Mínimo	42	45	36	65	52
Desv. Est.	3.7	30.4	15.3	2.0	2.5
C. V.	7.3	35.8	29.9	3.1	4.6

En la Figura 7.9. Se puede observar que la resistencia a la extracción de tornillos de la LMP es de 50 kg, al evaluar sobre la cara del tablero, tanto la LMP como el Triplay presentan una diferencia de resistencia muy similar, sin embargo, muy inferior al tablero de OSB y Aglomerado, no presenta grande diferencia con el tablero MDF, y al comparar con los resultados obtenidos por Espinoza (2002) se encontró una resistencia de la LMP, Triplay, Aglomerado y MDF, por debajo de los materiales utilizados en la industria de construcción (anexo VIII). El OSB es el único material que presenta un valor semejante.

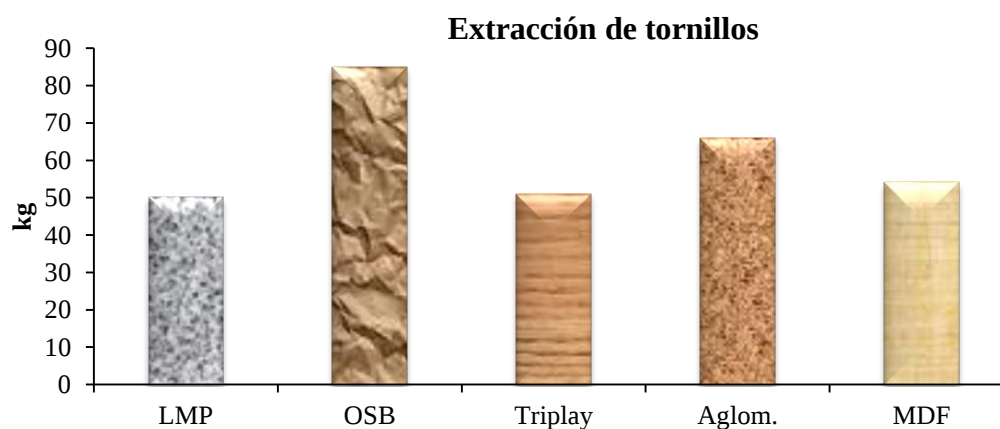


Fig. 7.9. Extracción de tornillos sobre la cara de la LMP y los materiales de referencia.

7.4.2 Análisis de la resistencia mecánica de la superficie en la LMP

En el Cuadro 7.13. Se muestran los valores de la resistencia (sin ciclo de degradación) que sufre tanto la lámina hecha a base de madera y plástico, así como la de asbesto, esto al aplicar una carga proveniente de una máquina universal.

Cuadro 7.13. Prueba de resistencia de carga (kg/cm³), sin ciclos de degradación.

MATERIAL	LMP	ASBESTO
Promedio	63.3	45.9
Máximo	66	53
Mínimo	61	43
Desv. Est.	1.6	3.6
C. V.	2.5	7.9

Los valores promedios obtenidos dentro de este ensayo fueron de 63.3 kg para la madera plástico y 45.9 kg para la lámina de asbesto. Por lo tanto los resultados muestran que la lámina hecha a base de madera y plástico tiene una mayor resistencia en un claro de 900 cm², comparada con la lámina de asbesto.

En el Cuadro 7.14, se presentan los valores obtenidos para los ensayos de resistencia a la superficie con ciclos de degradación en la madera plástico.

Cuadro 7.14. Prueba de resistencia de carga (kg/cm³), con ciclos de degradación.

MATERIAL	LMP
Promedio	24.4
Máximo	33
Mínimo	19
Desv. Est.	4.8
C. V.	19.5

La resistencia máxima promedio fue de 24.4 kg/cm³ al ser sometido durante periodos de degradación, este valor al ser comparado con la resistencia obtenida sin ciclos de degradación, muestra una disminución de la resistencia en un 38.54 % del material plástico (figura 7.10).

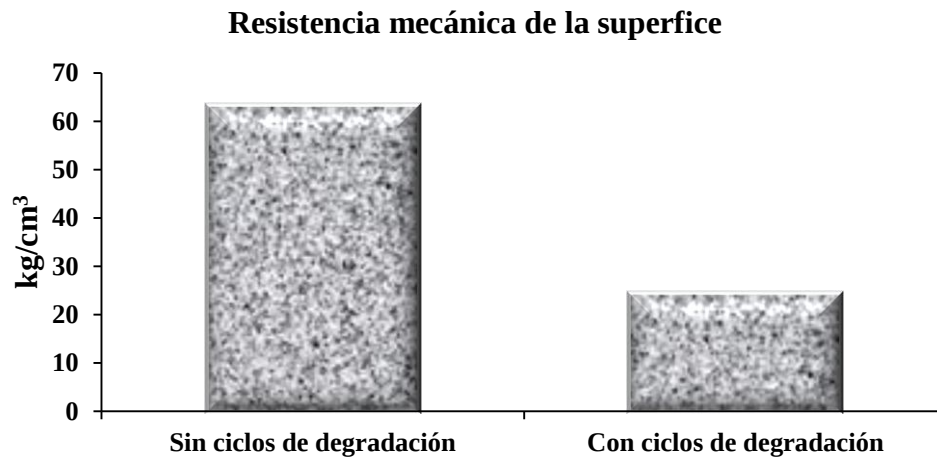


Fig. 7.10. Comparación de la resistencia de la LMP sin ciclos y con ciclos de degradación.

7.4.3 Clasificación y resumen de resultados de las propiedades físicas y mecánicas de la LMP en base a los materiales de referencia

En el Cuadro 7.15 y Cuadro 7.16, se presentan los valores obtenidos durante las pruebas físicas y mecánicas realizadas para la LMP en base a los materiales de referencia.

Cuadro 7.15. Clasificación de propiedades de la lámina hecha a base de madera y plástico.

Propiedades	Valor	Clasificación
Propiedades Físicas		
Densidad	1.27 g/cm ³	Alta
Dureza	69 HD	Alta
Absorción de agua a un año	7.77%	Muy Baja
Hinchamiento del espesor a un año	12%	bajo
Degradación del material	No	Muy bajo
Comportamiento al Fuego		
Pérdida de peso (tubo de combustión)	76.9%	Alta
Resistencia de carga bajo fuego	01:11 minutos	Muy bajo
Tiempo de ignición del fósforo a través del tablero	03:58 minutos	Muy alto
Conductividad térmica (Termopar)	265 °C	Media
Propiedades Acústicas		
Generación de ruido		Bueno
Propiedades Mecánicas		
Resistencia a la extracción de tornillos	50 kg	Media
Resistencia mecánica de la superficie:		
Sin ciclos de degradación	63.3 kg	Bueno
Con ciclos de degradación	24.4 kg	Muy bajo

Cuadro 7.16. Resumen de las propiedades de la LMP y los materiales de referencia.

Propiedades Físicas	Unidades	LMP	Asbesto	Fibra de vidrio	OSB	MDF	Triplay	Fibra	Madera
Densidad normal	g/cm ³	1.27							
Dureza	HD	69			57	57	37	65	
Absorción de agua a un año	%	7.77							
Hinchamiento del espesor a un año	%	12							
Degradación del material		no			si	si	si	si	
Comportamiento al Fuego									
Pérdida de peso (tubo de combustión)	%	76.9							83.6
Resistencia de carga bajo fuego	min	01:11	01:43:12		02:49				
Deformación de la pieza por la acción del fuego		si	si		no				
Tiempo de ignición del fósforo a través del tablero	min	03:58	01:28		04:49				
Conductividad térmica:									
Temperatura inicial	° C	22.2	19.4		25.3				
Temperatura a 3 min	° C	193	321		69.3				
Temperatura a 5 min	° C	249	--		81.8				
Temperatura a 8 min	° C	277	--		129				
Temperatura a 10 min	° C	264	--		162				
Temperatura a 13 min	° C	265	--		193				
Temperatura a 15 min	° C	--	--		208				
Temperatura a 18 min	° C	--	--		222				
Temperatura a 20 min	° C	--	--		232				
Propiedades Acústicas									
Generación de ruido									
Altura (50 cm)	dB	46	48	53					
Altura (100 cm)	dB	48	52	54					
Altura (300 cm)	dB	53	54	59					
Altura (500 cm)	dB	62	65	74					
Propiedades mecánicas									
Resistencia a la extracción de tornillos	kg	50			85	54	51	66	
Resistencia a la carga:									
Sin ciclos de degradación	kg	63.3	45.9						
Con ciclos de degradación	kg	24.4							

8. CONCLUSIONES

Densidad

Aun cuando el valor mínimo de la densidad de la LMP es de 1.07 g/cm^3 , es considerado un material de alta densidad que supera a los rangos mencionados por Youngquist (1999); París y Gonzales (2009); Klyosov (2007).

Dureza (HD)

La LMP presentó una dureza alta o superior a los materiales de referencia evaluados, esta dureza es debida principalmente a la alta densidad que presenta la LMP.

Comportamiento al agua

El comportamiento al agua de la LMP fue excelente durante los primeros meses, presentando una alta estabilidad dimensional tanto en el hinchamiento del espesor como en la adsorción del agua.

Degradación por medio de ciclos de inmersión en agua y secado

Al ser sometido a un ambiente o condiciones determinadas de ciclos humedad y secado, la LMP presenta un potencial de duración alto y un comportamiento muy estable. Además, no sufre degradación y cambios en su estructura física, a comparación con los materiales de referencia los cuales mostraron un comportamiento inestable.

Comportamiento al fuego

La LMP presentó una pérdida de peso menor que la madera sin tratar durante la prueba de combustión. Sin embargo, fue el material que tardó más tiempo en apagarse, y generó desprendimiento de humo más rápido, por lo que se considera un material flamable. Esta característica radica principalmente en el plástico, según Estrucplan On Line (s/f).

La conductividad térmica de la LMP fue más baja que la de la lámina de asbesto, al obtener el tiempo más largo al iniciar la ignición de los fósforos a través del material, así como alcanzar temperaturas más bajas en diferentes intervalos de tiempo.

Propiedades acústicas

La LMP presentó una generación de sonido muy baja a diferentes alturas, debido principalmente a la composición del mismo, ya que el relleno que utiliza (madera) tiene muy buenas propiedades acústicas que ayudan a aislar el sonido y absorberlo.

Resistencia a la extracción de tornillos

La LMP presentó una resistencia a la extracción de tornillos de 50 kg, por lo que se considera un material con una resistencia media, al obtener un valor muy parecido al tablero de Triplay y al tablero de MDF.

Resistencia mecánica de la superficie

La LMP presentó una mayor resistencia que la lámina de asbesto en un claro de 900 cm³. Sin embargo la LMP disminuyó su resistencia en un 38.54 % al ser sometida a ciclos de degradación.

9. RECOMENDACIONES

Se recomienda elaborar LMP en diferentes proporciones de fibra de madera y plástico, así como también incorporar otros tipos de especie de fibra de madera, dentro del contexto de proceso de producción, para aumentar o mejorar las propiedades físico-mecánicas del material.

Debido a que la LMP presentó, propiedades acústicas excelentes a los materiales de referencia, una excelente resistencia al agua, una resistencia considerable a la extracción de tornillos, mayor dureza que los tableros de referencia, menor conductividad térmica que la lámina de asbesto y características similares a otros tableros en la pruebas de resistencia al fuego (cuadro 7.15 y cuadro 7.16), se predice que este puede ser un buen sustituto a las láminas de asbesto y láminas de fibra de vidrio, principales materiales utilizados en la industria de construcción útiles para techados y sombreados.

10. BIBLIOGRAFIA

- Adhikary, K.; Pang, S.; Staiger, M. (2008). Dimensional Stability and Mechanical Behavior of wood-plastic composites based on recycle and virgin high-density polyethylene (HDPE). *Composites Part B: Engineering*, 39 (5):807-815.
- Arroyo, M.; López, M. (2003). Fibras naturales como refuerzos de matrices poliméricas. *Revista Plásticos Modernos: Ciencia y tecnología de polímeros*, N° 564. Pp: 594-600.
- Arredondo, F. (1972). Estudio de materiales. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento. Madrid, España.
- Ashori, A.; Nourbakhsh, A. (2008). A comparative study on mechanical properties and water absorption behavior of fiber-reinforced polypropylene composites prepared by OCC fiber and aspen fiber. *Polymer Composites*, 29(5): 574–578.
- Ashori, A.; Nourbakhsh, A. (2009). Characteristics of wood-fiber plastic composites made of recycled materials. *Waste Management*, 29(4): 1291-1295.
- Asi funciona, (2012). Intensidad en decibeles (dB) de diferentes fuentes de sonidos comunes. [Internet]. Madrid, España. Disponible en: <http://www.asifunciona.com/tablas/intensidad_sonidos/intensidad_sonidos.htm>. [consulta: junio 4, 2014].
- ASTM (American Society for Testing and Materials). 2001. Standard Test Method for Combustible Properties of Treated Wood by the Fire-Tube Apparatus. E 69-99. Annual book of ASTM standards. Section 4: Construction. Volume 14.10: Wood. Conshohocken, Pa. pp. 19428-2959.
- Beltrán, M.; Marcilla, A. (s/f). Estructura y propiedades de los polímeros. *Tecnología de polímeros*. Pp: 61-273.
- Benitez, R.; Romero, R. (1985). Resistencia al fuego de elementos estructurales de la madera de pino, usados en la construcción. Tesis Profesional. Escuela de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacán de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, México.

- Bland, D. (1985). The composition and Analysis of eucalyptus wood. *Appita* 38 (4): 291–294.
- Bledzki, K.; Faruk, O. (2006). Microcellular injection molded wood fiber-PP composites: Part I-effect of chemical foaming agent content on cell morphology and physic-mechanical properties. *Journal of Cellular Plastic*, 42(63): 63-76.
- Bledzki, K.; Gassan, J. (1999). Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in Polymer Science*, 24(2): 221–274
- Bledzki, A. K.; Letman, M.; Viksne, A.; Rence, L. (2005). Comparison of compounding processes and wood type for wood fibre-PP. Composites. Part A-Applied Science and Manufacutiring, 36(6): 789-797.
- Biedzki, A. K.; Reihmane, S.; Gassan, J. (1996). Properties and modification methods for vegetable fibers for natural fiber composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 59(8): 1329–1336.
- Browning, B. (1967). *Methods of wood chemistry*, Intersci, Public. N.Y., London, Vol. 2. Pp:800.
- Carvalho L.; Batista, W. (1995). Propiedades mecánicas de compositos poliester/Juta efeitos de tratamentos superficiais no reforgo. *Anais do III Congresso Brasileiro de Polímeros*. Río de Janeiro. Brasil. Pp: 1349.
- Cervantes, L.; Ortega, A.; Garza, R. (2006). *Compósitos de Madera Plástica*. México. Disponible en :< <http://rolandog.com/wp-content/uploads/2006/12/reporte.pdf>>.
- CSIC (Consejo Superior de Investigaciones Científica). *Ciencia y tecnología de los materiales plásticos*. Revista de plásticos modernos, Volumen I, Madrid, España. (1990).
- Clemons, C. (2002). Wood-plastic composites in the United States: the interfacing of two industries. *Forest Products journal*, 52(6): 10-18.
- Córdoba, C.; Mera, J.; Martínez, D.; Rodríguez, J. (2010). Aprovechamiento de polipropileno y polietileno de alta densidad reciclado y reforzado con fibra vegetal, Tetera (Stromanthe Stromathoides). *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 11(7): 417-427.

- Corona, T. J. (2008). Caracterización físico-mecánica de un material compuesto a base de aserrín y cemento. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Ecorenova, (s/f). Productos reciclados y reciclables. [Internet]. Disponible en: <http://www.solsureste.com/index.php?option=com_content&view=article&id=72&Itemid=72> [consulta: abril 02, 2014].
- Echenique-Manrique, R.; Plumptre, R. (1994). Guía para el uso de la madera de Belice y México. Universidad de Guadalajara. Consejo Británico, Laboratorio de Ciencia y Tecnología de la Madera, A. C., Universidad de Oxford. Oxford.
- Espinoza, H. R. (2002). Elaboración y evaluación de un tablero a base de yeso y partículas de madera y su confrontación con otros tableros. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Enderle, H. F. (2008). Polyethylene: High-density. Encyclopedia of Materials: Science and Technology. Pp: 7172-7180.
- English, B.; Stark, N.; Clemons, C. (1997). Weight Reduction: Wood versus Mineral Fillers in Polypropylene Fourth International Conference on Wood fiber-Plastic Composites. May 12-14, Madison, Wisconsin, USA.
- English, B.; Stark, N.; Clemons, J. (1996). Waste-Wood-Derived Fillers for Plastics. Forest Products Laboratory. Madison, Wisconsin. United States.
- Estrucplan On Line, (s/f). Degradación Térmica de los Plásticos. [Internet]. Disponible en: <<http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/entrega.asp?IdEntrega=3107>>. [consulta: junio 4, 2014].
- Faruk, O.; Bledzki, A.; Matuana, L. (2007). Microcellular foamed wood-plastic composites by different processes: A review. Macromolecular Materials and Engineering, 292(2): 113-127.
- Falk, R. H. (1994). Housing products from recycled wood. International Conference CIB TG 16. Sustainable Construction. Tampa, Florida. USA. November.

- Falk, R.H.; Mckeever, D.B. (2004). Recovering wood for reuse and recycling a United States perspective. In C. Gallis (Ed.). European COST E31 conference management of recovered wood recycling, bioenergy and other options. Thessaloniki: University Studio Press.
- Fengel, D.; Wegener, G. (1984). Wood Chemistry, Ultrastructure Reaction, Walter de Gruyter, Berlín. Pp: 2-220.
- Fuentes, M. (s/f). Apuntes para el curso de Tecnología de la Madera. Serie de apoyo académico No. 33. Universidad Autónoma de Chapingo.
- García, M. (2004). Aditivos, cargas y refuerzos para materiales plásticos. Ciencia y Tecnología de Materiales Poliméricos. Vol. II. Pp: 315-330.
- Gardner, D. J.; Murdock, D. (s/f). Extrusion of Wood Plastic Composites. Fibre Composites. University of Maine, Orono, Me, USA.
- Gordon, J. E. (1988). The New Science of Strong Materials (or Why You Don't Fall Through the Floor). 2nd ed. Princeton University Press, Princeton, NJ. Paperback, 8vo. Pp. 287.
- Grigoriev, M. A. (1985). Estudio de materiales para ebanistas y carpinteros. Ed. Mir. Moscu, URSS. Pp.291.
- Harper, D.; Wolcott, M. (2004). Interaction between coupling agent and lubricants in wood–polypropylene composites. Composites: Part A, 35(3): 385-394
- Hedenberg, P.; Gatenholm, P. (1996). Conversion of plastic-cellulose waste into composites. Improving adhesión between polyethilene and cellulose using ozone. Journal of Applied Polymer Science, 60(13): 2377-2385.
- Hummel, D. O. (2002). Atlas of Plastics Additives: analysis by spectrometric methods. Springer-Verlag, Berlin, 53(3): 355–356.
- Ichazo, M.; Albano, C.; González, J; Perera R; Candal M. (2001). Polypropylene/wood flour composites: treatments and properties. Composite Structures, 54 (2): 207-214.
- JAS (Japanese Agricultural Standard Association) 2000.

- Jayaraman, K.; Bhattacharyya, D. (2004). Mechanical performance of wood fiber–waste plastic composite materials. *Resources Construction and Recycling*, 41(4): 307-319.
- Kishbaugh, L.; Xu, J.; Casale, M. (2002). Prediction of the mechanical properties with part weight reduction for injection molding microcellular foam parts, SPE ANTEC tech. paper 2:1905-1909.
- Klyosov, A. (2007). *Wood-Plastic Composite*. John Wiley-Interscience Inc. Hoboken, New Jersey. USA.
- Kollmann, F. (1959). *Tecnología de la madera y sus aplicaciones*. Tomo I. Misterio de agricultura. Dirección general de Montes, Caza y Pesca Fluvial. Madrid, España.
- Leaversuch, R. D. (2000). Wood-fiber composites build promising role in extrusion, *Modern Plastics*, 30(12): 56-59.
- Li, Q.; Matuana, L. (2003). Foam extrusion of high density polyethylene/Wood-flour composites using chemical foaming agents. *Journal of Applied Polymer Science*, 88(14): 139-3150.
- Lucchetta, G.;Bariani, P.F.; Knight, W.A. (2006). A New Approach to the Optimization of Blends Composition in Injection Moulding of Recycled Polymers. *Annals of the CIRP-Manufacturing Technology*, 55(1): 465–468.
- Lu, J. Z.; Wu Q.; McNabb Jr. H. S. (2000). Chemical coupling in wood fiber and polymer composites: A review of coupling agents and treatments. *Wood and Fiber Science*, 32(1): 88-104.
- Lu, J. Z.; Wu Q.; Negulescu, I. I. (2004). Surface and Interfacial Characterization of Wood-PVC Composites. Thermal and Dynamic Mechanical Properties. *Wood and Fiber Science*, 36(4): 500-510.
- Lu, J. Z.; Wu, Q.; Negulescu, I. (2005). Wood–fiber/high-density-polyethylene composites: coupling agent performance. *Journal of Applied Polymer Science*, 96(1): 93–102.

- Lundin, Y.; Cramer, S.M.; Falk, R.H.; Felton, C. (2004). Accelerated weathering of natural fiber-filled polyethylene composites. *Materials in Civil Engineering*, 16(6): 547-555.
- Magin, G. (2001). An introduction to wood waste in the UK. Published by Fauna & Flora International. Cambridge. 40 pp.
- Martínez, S. (2010). Caracterización de materiales plásticos. [Internet]. Disponible en: < <http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/6284-Characterizacion-de-materiales-plasticos.html>> [consulta: junio 4, 2014].
- Mariano, O. (2011a). Fibra de vidrio. [Internet]. Disponible en: < <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.mx/2011/12/fibra-de-vidrio.html>>. [consulta: mayo 12, 2014].
- Mariano, O. (2011b). Tecnología de los plásticos. [Internet]. Disponible en: < http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.mx/p/reciclado-de-materiales-plasticos_17.html>. [consulta: mayo 12, 2014].
- Mariano, O. (2012). Tecnología de los plásticos. [Internet]. Disponible en: < <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.mx/2012/09/compuestos-de-madera-y-plastico.html>>. [consulta: mayo 12, 2014].
- Mariscal, J. (2001). Análisis de placas planas de fibrocemento en sección mixta con perfiles de acero. Especialización en estructuras. Facultad de Ingeniería-Manizales. Universidad Nacional de Colombia.
- Mascia, L. (1989). Thermoplastics: Materials Engineering. Elsevier. Elsevier Applied Science, 41(11): 594-594.
- Matuana, L.; Park, C.; Balatinecz, J. (1996). Characterization of microcellular foamed PVC/cellulosic-fibre. *Journal of Cellular Plastics*, 32(5): 449-469.
- Matuana, L.; Park, C.; Balatinecz, J. (1997). Processing and cell morphology relationships for microcellular foamed PVC/wood fibre composites. *Polymer Engineering & Science*, 37(7): 1137-1147.

- Matuana, L.; Balatinecz, J.; Park, C. (1999). Foaming of woodfiber-plastic composites. The Fifth International Conference on Woodfiber-Plastic Composites. Madison, Wisconsin, USA.
- Maiti, S. N.; Singh K. (1986). Influence of wood flour on the mechanical properties of polyethylene. *Journal of Applied Polymer Science*, 32(3): 4285–4289.
- Mengeloglu, F.; Matuana L. (2004). Mechanical properties of extrusion-foamed rigid PVC/wood-flour composites. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 9(1): 26-31.
- Meyer, R. W.; Kellogg, R. M. (1982). *Structural Use of Woods in Adverse Environments*. Society of Wood Science and Technology. Van Nostrand Reinhold Company. New York, U.S.A.
- Mohanty, A.K.; Misra, M.; Drzal, L.T. (2001). Surface modifications of natural fibers and performance of the resulting biocomposites: An overview. *Composite Interfaces*, 8 (5): 313-343.
- Morales, S. (2008). *Fibra de vidrio, pruebas y aplicaciones*. Tesis profesional. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Instituto Politécnico Nacional.
- Nicholas, D. D.; Loos W. E. (1973). *Wood Deterioration and Its Prevention by Preservative Treatments*. Volume I: Degradation and Protection of Wood, and Volume II: Preservatives and Preservative Systems. Syracuse University Press, U.S.A.
- París, L. S.; González S. M. (2009). Caracterización de los materiales plásticos reciclados provenientes de la industria bananera empleados para la elaboración de madera plástica. *Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, S1 (4): 1-4.
- Platt, B.; Lent, T.; Walsh, B. (2005). *Guide to Plastic Lumber*. The Healthy Building Network. Washington, DC. Pp: 26.
- Ramos, M.A.; Marín, M.R. (1988). *Ingeniería de los materiales plásticos*. Ed. Díaz de Santos, Madrid, España.

- Reyes, J. L. (2001). Eficiencia de dos productos comerciales retardantes al fuego. Tesis Profesional. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Ricalde, C.; Barcenas P. (1989). Propiedades físicas de la madera. Manual para el diseño de estructuras de madera. Instituto de ecología. A. C. Laboratorio de ciencia y tecnología de la madera. Xalapa.
- Rivzi, G.; Park, C.; Guo, G. (2008). Strategies for processing wood plastic composites with chemical blowing agents. *Journal of Cellular Plastics*, 44(2): 3505 – 3511.
- Rowell, R. M.; Caul eld, D. F.; Chen, G.; Dale, Ellis W.; Jacobson, R. E.; Lange, S.; Schumann, R. (1998). Recent advances in agro fiber thermoplastic composites. Second International Symposium On Natural Polymers and Composites. Atibaia, SP, Brasil.
- Rowell, R. M.; Lange S.E.; Jacobson R. E. (2000). Weathering performance of plant-fiber thermoplastic composites. *Mol. Cryst. And Liquid Cryst*, 353: 85-94.
- Rowell, R. M.; Barbour R. J. (1990). Archeological Wood Properties, Chemistry, and Preservation. *Advances in Chemistry Series 225*. American Chemical Society, Washington, U.S.A.
- Rowell, R. M., Youngquist, A. (1991). Composites from recycled materials. 25th Simposium international of particleboards-composite materials. Washington State University.
- Semeralul, H. O.; Islam, M. R.; Rizvi, G. M. (2009), Paper# 0425-2009. R2 ANTEC 2009 Chicago, IL
- Siau, F. (1975). Fire behavior of treated wood and wood-polymer composites. *Wood science*, 8(1): 375-383.
- Smith, P. M. (2001). U.S. woodfiber-plastic composite decking market. In: *Proc. Sixth International Conference on Woodfiber-Plastic Composites*. Forest Prod. Soc. Madison, WI.

- Stark, N. M.; Rowlands R.E. (2003). Effects of wood fiber characteristics on mechanical properties of wood/polypropylene composites. *Wood and Fiber Science*, 35(2): 167-174.
- Stokke, D.D. (2003). Gardner, D.J. In *Fundamental Aspects of Wood as a Component of Thermoplastic Composites*. *Journal of Vin and Add Tech*, 9(2): 96-104.
- Tornqvist, R.; Sunderland, P.; Manson, J. (1998). Processability and properties of composites for compression flow moulding. In: *Proceedings of the American Society for Composites*. 13th Conference on Composite Materials. Baltimore, USA.
- USDA (United States Department of Agriculture). *Wood handbook: Wood as an engineering material*. United States Department of Agriculture. Handbook No. 72. Forest Products Laboratory. Washington, D. C. (1987).
- Wambua, P.; Ivens, J.; Verpoest, I. (2003). Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics?. *Composites Science and Technology*, 63(9): 1259–1264.
- Wilkins, E. y Munrray F. (1980). Toxicity of emissions from combustion and pyrolysis of wood. *Wood science and techonology*, 14(4): 281-288.
- Yeh, Sh.; Agarwal, S.; Gupta, R. K. (2009). Wood–plastic composites formulated with virgin and recycled ABS. *Composites Sc. and Tech.*, 69(13): 2225-2230.
- Youngquist, J. A. (1995). The marriage of wood and nonwood materials. *Forest Prod.*, 45(10): 25–30
- Younquist, J. A. (1999). *Wood-Based Composites and Panel products*. *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*, Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113, Madison, WI: US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Zabel, R. A.; Morrell, J. J. (1992). *Wood Microbiology. Decay and Its Prevention*. Academic Press, Inc. San Diego, U.S.A.

11. ANEXOS

Anexo I

Tabla de clasificación de densidades según Echenique-Manrique (1994).

Clasificación	Densidad (g/cm ³)
Muy bajo	<0.26
Bajo	0.27-0.38
Mediano	0.39-0.56
Alto	0.57-0.70
Muy alto	0.71-0.89
Extremadamente alto	>0.90

Anexo II

Tabla de densidades de diferentes materiales según Beltrán M. y Marcilla A. (s/f).

Material	Densidad (g/cm ³)
Plásticos	0.9-2.3
PVC	1.2-1.4
Acero	7.8
Aluminio	2.7

Anexo III

Hinchamiento del espesor por inmersión en agua (%) durante 2 y 24 horas del tablero de yeso/astillas, y los materiales de referencia (Espinoza, 2002).

Material	MDF	Madera	Aglomerado	Contrachapado	Tablaroca	Yeso/astilla
ξ a 2 horas	1.54	3.00	5.42	3.96	1.42	0.06
ξ a 24 horas	10.57	3.04	15.8	4.85	1.42	0.05
Dif. 2 a 24 h	9.03	0.4	10.38	0.89	0	-0.01
Rango a 2 h	0.81 - 1.63	1.63 - 4.10	4.03 – 6.45	2.56 – 5.17	0.79 – 1.57	0.00 – 0.70
Rango a 24 h	9.76 – 11.38	2.44 – 3.85	13.60 – 19.20	3.42 – 6.03	0.79 – 2.36	0.00 – 0.71

Anexo IV

Absorción de agua (%) de los materiales de referencia y el tablero de yeso/astillas (Espinoza, 2002).

Material	MDF	Madera	Aglomerado	Contrachapado	Tablaroca	Yeso/astilla M20
a 2 horas	10	46	24	41	67	35
ξ a 24 horas	38	54	47	53	63	40
Dif. 2-24 h	28	8	23	12	-4	5

Anexo V

Tiempo de ignición del fósforo a través de diversos materiales (Espinoza, 2002).

Material	Minutos	Minutos relativos al espesor de la LMP
Tablero de fibras MDF	9:29	4.64
Madera de pino	9:23	4.61
Tablero aglomerado	13:43	4.47
Tablero contrachapado	9:19	4.59
Tablaroca	14:37	7.18
Tablero yeso/astilla (malla 40)	23:53	11.76

Anexo VI

Temperaturas (°C) registradas durante el ensayo de conductividad térmica de los materiales de referencia y el tablero de yeso/astillas (Espinoza, 2002).

Minutos	0	3	5	8	10	15	20
MDF	25.5	76.3	71	88	115	---	---
Madera	26.6	71	68	86	100	---	---
Aglomerado	25	82	86	76	72	103	116
Contrachapado	25.3	95	110	95	95	111	109
Tablaroca	28	54	58	64	67	72	87
Yeso/astillas	26	50	57	59	60	68	83

Temperaturas (°C) relativas al espesor de la LMP

Minutos	0	3	5	8	10	15	20
MDF	25.5	152.6	142	176	230	--	--
Madera	26.6	142	163	172	200	--	--
Aglomerado	25	164	172	152	144	206	232
Contrachapado	25.3	190	220	190	190	222	218
Tablaroca	28	108	116	128	134	144	174
Yeso/astillas	26	100	114	118	120	132	166

Anexo VII

Tiempo promedio de resistir la carga bajo fuego, de los materiales de referencia y el tablero yeso/astillas de malla 40 (Espinoza, 2002).

Tipo de material	Minutos de resistencia	Minutos relativos al espesor de la LMP
Tablero de fibras MDF	4:21	2.1
Madera de pino	8:10	4.05
Tablero aglomerado	5:25	2.62
Contrachapado perpendicular	4:05	2.02
Tablaroca perpendicular	0:14	0.1
Tablero yeso/astillas de malla 40	9:21	4.6

Anexo VIII

Resultados de la extracción de tornillos (kg) de los materiales de referencia (Espinoza, 2002).

Material	Resistencia (Kg)	Resistencia relativa al espesor de la LMP (Kg)
MDF	144	72
Madera	219	109.5
Aglomerado	161	80.5
Triplay	164	82
Tablaroca	15	7.5