



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

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

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
Maestría en Ciencias y Tecnología de la Madera

**Elaboración y evaluación de un compuesto a base de partículas
de madera de *Eucalyptus nitens* y plástico**

TESIS

Que para obtener el grado de
Maestro en Ciencias y Tecnología de la Madera

Presenta:

Eduardo Raya Aguilar

Director de tesis:

Dr. Raúl Espinoza Herrera

Morelia, Michoacán, Junio 2017.



Agradecimientos

Antes que nada quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. Raúl Espinoza Herrera, por haberme brindado la oportunidad de trabajar con él, por haber tenido la paciencia necesaria para ayudarme, por transmitirme su conocimiento y por ser demasiado accesible en todo momento.

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, M. Angélica, J. Antonio, Javier, Jesús, José, M. Ángel y María.

También deseo agradecer a los sinodales encargados de revisar y corregir este trabajo, Dr. Jorge Enrique Ambríz Parra, M.C. Marco Antonio Herrera Ferreyra, M.C. Héctor Manuel Sosa Villanueva, M.C. Roberto Calderón Muños

A CONACYT por la beca que me proporcionaron, porque gracias a ello, fue posible mi estancia en este proyecto de investigación. A la facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera y a la UMSNH, por la oportunidad de seguir adelante en mi formación y por el gran apoyo brindado durante este tiempo.

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

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	2
2. ANTECEDENTES	4
2.1 Compuestos de madera y plástico (WPC)	4
2.1.1 Comercialización de WPC	7
2.1.2 Fibras utilizadas en WPC	7
2.1.3 Geometría de la partícula de madera	8
2.1.4 Densidad	9
2.1.5 Absorción de agua e hinchamiento del espesor	10
2.1.6 Dureza	10
2.1.7 Extracción de tornillos	10
2.1.8 Resistencia a la flexión estática	11
2.1.9 Métodos para formar los WPC	12
2.2 Plásticos	14
2.2.1 Termoplásticos	14
2.2.1.1 Polietileno (PE)	14
2.2.1.2 Tereftalato de polietileno (PET)	16
2.2.1.3 Polipropileno (PP)	16
2.2.2 Termoestables	16
2.2.3 Elastómeros	16
2.3 Generalidades de <i>Eucalyptus nitens</i>	17
3. JUSTIFICACIÓN	20
4. HIPÓTESIS	21
5. OBJETIVOS	21
6. MATERIALES Y MÉTODOS	22
6.1 Desarrollo del diseño experimental	22
6.2 Preparación de la materia prima	23
6.2.1 Partículas de <i>Eucalyptus nitens</i>	23
6.2.2 Plástico de baja densidad	24
6.3 Elaboración del material compuesto	25

6.3.1	Proporciones de madera y plástico	25
6.3.2	Método de moldeo por compresión	25
6.3.3	Prensado del material compuesto	26
6.3.4	Dimensionado de las probetas	27
6.4	Evaluación física y mecánica del compuesto de madera-plástico	27
6.4.1	Determinación de la densidad.....	27
6.4.2	Determinación del hinchamiento del espesor y absorción de agua	28
6.4.3	Determinación de la dureza Shore D.....	30
6.4.4	Determinación de la dureza Janka.....	30
6.4.5	Ensayo de extracción de tornillos.....	31
6.4.6	Ensayo de flexión estática	32
6.5	Análisis estadístico	33
7.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
7.1	Inspección visual de las muestras.....	34
7.2	Propiedades físicas y mecánicas.....	35
7.2.1	Resultados para la densidad	35
7.2.2	Resultados del hinchamiento del espesor y absorción de agua	38
7.2.3	Resultados para la dureza Shore D (HD)	44
7.2.4	Resultados para la dureza Janka	46
7.2.5	Resultados en la resistencia a la extracción de tornillos	48
7.2.6	Resultados en la flexión estática (MOE).....	50
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	54
9.	BIBLIOGRAFIA	56
10.	ANEXOS	64

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Variación de la densidad en función de la edad de árboles de <i>Eucalyptus nitens</i>	18
Cuadro 2. Factores y niveles considerados en el diseño experimental.....	22
Cuadro 3. Tratamientos del diseño experimental.....	22
Cuadro 4. Resultados de la densidad (g/cm^3).....	36
Cuadro 5. Análisis de varianza de la densidad.....	36
Cuadro 6. Resultados del hinchamiento del espesor (%).....	39
Cuadro 7. Análisis de varianza para el hinchamiento del espesor.....	40
Cuadro 8. Resultados de la absorción de agua (%).....	42
Cuadro 9. Análisis de varianza para la absorción de agua.....	43
Cuadro 10. Resultados de la dureza Shore D (HD).....	44
Cuadro 11. Análisis de varianza de la dureza Shore D (HD).....	45
Cuadro 12. Resultados de la dureza Janka (kg/cm^2).....	46
Cuadro 13. Análisis de varianza para la dureza Janka.....	47
Cuadro 14. Resultados de la resistencia a la extracción de tornillos (kg).....	48
Cuadro 15. Análisis de varianza para la resistencia a la extracción de tornillos.....	49
Cuadro 16. Resultados del módulo de elasticidad en flexión.....	51
Cuadro 17. Análisis de varianza del módulo de elasticidad.....	51
Cuadro 18. Resumen de las propiedades físicas y mecánicas del material compuesto con partículas de <i>Eucalyptus nitens</i> y PEBD.....	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Extrusión de WPC.....	13
Fig. 2. Proceso de inyección.....	13
Fig. 3. Moldeo por compresión	13
Fig. 4. <i>Eucalyptus nitens</i> : A) Árbol, B) Corteza, C) Hojas y Fruto, D) Flores	18
Fig. 5. Proceso de molienda y tamizado de <i>Eucalyptus nitens</i>	24
Fig. 6. Tipos de tamaños de partícula obtenidos por las diferentes mallas	24
Fig. 7. Polietileno de baja densidad (PEBD).....	24
Fig. 8. Control de las proporciones de madera y plástico.....	25
Fig. 9. Método de moldeo para compuestos de <i>Eucalyptus nitens</i> con PEBD.....	25
Fig. 10. Placa de calentamiento	26
Fig. 11. Registro de la temperatura.....	26
Fig. 12. Proceso del prensado A) molde B) vaciado de la mezcla C) Prensado D) Prensado directo	26
Fig. 13. Maquinaria para el dimensionado de probetas.....	27
Fig. 14. Evaluación física y mecánica del material compuesto.....	27
Fig. 15. Determinación de la densidad de probetas fabricadas con partículas de <i>Eucalyptus nitens</i> y PEBD	28
Fig. 16. Ensayos de hinchamiento del espesor y absorción de agua.	29
Fig. 17. Ensayo de la dureza Shore D (HD).....	30
Fig. 18. Ensayo de la dureza Janka.....	31
Fig. 19. Máquina universal Shimadzu ®.....	31
Fig. 20. Esquema de la extracción de tornillos.....	31
Fig. 21. Ensayo de resistencia a la flexión	32
Fig. 22. Probetas para los ensayos de flexión.....	34
Fig. 23. Probetas elaboradas para cada uno de los tratamientos.....	35
Fig. 24. Densidad en función de las proporciones madera-plástico	37
Fig. 25. Densidad en función del tamaño de partícula de la madera.....	37
Fig. 26. Interacciones entre tamaño de partícula y proporciones (madera-plástico) y su efecto en la densidad.....	37

Fig. 27. Hinchamiento del espesor a 72 h en función de las proporciones de la mezcla madera-plástico.....	40
Fig. 28. Hinchamiento del espesor a 72 h en función del tamaño de partícula de madera.....	40
Fig. 29. Interacciones entre tamaño de partícula y proporciones (madera-plástico) y su efecto en el hinchamiento del espesor a 72 h.....	41
Fig. 30. Absorción de agua a 72 horas en función de las proporciones de la mezcla madera-plástico.....	43
Fig. 31. Absorción de agua a 72 horas en función del tamaño de partícula de madera	43
Fig. 32. Interacciones entre tamaño de partícula y proporciones (madera-plástico) y su efecto en la absorción de agua a 72 h	44
Fig. 33. Dureza Shore D en función de las proporciones de la mezcla madera-plástico	45
Fig. 34. Dureza Shore D en función del tamaño de partícula de madera	45
Fig. 35. Interacciones entre tamaño de partícula y proporciones (madera-plástico) y su efecto en la dureza Shore D (HD)	46
Fig. 36. Dureza Janka en función de las proporciones de la mezcla madera-plástico.....	47
Fig. 37. Dureza Janka en función del tamaño de partícula de madera	47
Fig. 38. Interacciones entre tamaño de partícula y proporciones (madera-plástico) y su efecto en la dureza Janka	48
Fig. 39. Extracción de tonillos en función de las proporciones de la mezcla madera-plástico.....	49
Fig. 40. Extracción de tonillos en función del tamaño de partícula de madera.....	49
Fig. 41. Interacciones entre tamaño de partícula y proporciones (madera-plástico) y su efecto en la resistencia a la extracción de tornillos	50
Fig. 42. Módulo de elasticidad en función de las proporciones de la mezcla madera-plástico.....	52
Fig. 43. Módulo de elasticidad en función del tamaño de partícula de madera	52
Fig. 44. Interacciones entre tamaño de partícula y proporciones (madera-plástico) y su efecto en el módulo de elasticidad	52

ÍNDICE DE FÓRMULAS

Fórmula 1. Determinación de la densidad (ρ)	28
Fórmula 2. Determinación del hinchamiento del espesor (%He).....	29
Fórmula 3. Determinación de la absorción de agua (%Ab)	29
Fórmula 3. Determinación de módulo de elasticidad (MOE)	32

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 fabricar un material compuesto de polietileno de baja densidad y partículas de madera de *Eucalyptus nitens*, obtenido mediante un proceso de moldeo, analizando el efecto de la concentración y tamaño de partícula en el comportamiento físico y de resistencia mecánica del material. Se concluye que al aumentar la proporción y disminuir el tamaño de las partículas de madera, la densidad aumenta. A medida que incrementa el tamaño y la cantidad de partícula de madera, el hinchamiento del espesor aumenta. Al incrementar el tamaño y la cantidad de partículas madera, la absorción de agua aumenta. Al aumentar la proporción y tamaño de partícula de madera, aumenta la dureza Shore. Al aumentar la proporción y disminuir el tamaño de las partículas de madera, la dureza Janka aumenta. Al incrementar el tamaño y la cantidad de partículas de madera, se tiene una mayor resistencia a la extracción de tornillos. Al aumentar la proporción y el tamaño de las partículas de madera, el MOE disminuye. Los resultados demostraron que el material compuesto con partículas de *E. nitens* y PEBD tiene buenas propiedades tanto físicas como mecánicas para ser utilizados en lugares donde existe una humedad alta.

Palabras claves: *Eucalyptus nitens*; polietileno de baja densidad (PEBD); compuestos madera-plástico (WPC); residuos de madera y plástico.

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 the present study was to manufacture a low density polyethylene composite material and *Eucalyptus nitens* wood particles, obtained by a molding process, analyzing the effect of concentration and particle size on the physical and mechanical strength of the material. It is concluded that by increasing the proportion and decreasing the size of the wood particles, the density increases. As the size and amount of wood particle increases, the swelling of the thickness increases. By increasing the size and quantity of wood particles, the water absorption increases. By increasing the proportion and particle size of wood, Shore hardness increases. By increasing the proportion and decreasing the size of the wood particles, the Janka hardness increases. By increasing the size and quantity of wood particles, there is a greater resistance to the extraction of screws. By increasing the proportion and size of the wood particles, the MOE decreases. The results showed that the composite material with particles of *E. nitnes* and LDPE has good physical and mechanical properties to be used in places where there is high humidity.

Keywords: *Eucalyptus nitens*; low density polyethylene (LDPE); Wood-plastic composites (WPC); waste wood and plastic.

1. INTRODUCCIÓN

Los compuestos de madera y plástico (WPC, por sus siglas en inglés), son mezclas de plásticos reciclados (tales como polietileno, polipropileno y poliestireno) con partículas, fibras o harinas de madera, extruidos o moldeados de una forma específicamente adecuada. Estos compuestos son de creciente interés en el diseño y fabricación de nuevos productos ya que se convierten en una alternativa para reciclar el plástico y aprovechar el aserrín que se da como desecho del proceso de aserrío e industrias muebleras (English *et al.*, 1997; Wolcott y Englund, 1999; Wambua *et al.*, 2003).

Las investigaciones acerca de estos nuevos materiales compuestos, se han enfocado principalmente a mejorar la interacción físico-química entre la madera y el plástico. Estas investigaciones mencionan que la geometría de las partículas de madera, así como las proporciones de los materiales, influye en las propiedades del producto. Si la adhesión interfacial entre matriz plástica y partículas de madera es buena, entonces, se incrementa la dureza y rigidez (Stark y Gardner, 2008).

La técnica más utilizada para fabricar materiales compuestos a base de madera y plástico es la extrusión (Lu *et al.*, 2000; Gardner y Murdock, 2010; Rivzi *et al.*, 2008). Existen otros métodos, el de inyección y el de moldeo por compresión (procesos físicos y reversibles) donde se funde la madera y plástico por el efecto del calor, estos dos últimos métodos tienen mayores efectos positivos sobre las propiedades físicas y mecánicas de los materiales compuestos, aumentando la resistencia, rigidez y elasticidad (Mariano, 2011; Bouafif *et al.*, 2009).

Una de las principales aplicaciones de los compuestos madera-plástico se encuentra en el recubrimiento de superficies expuestas a la intemperie, como son: muelles, terrazas, superficies cerca de piscinas o en centros de recreación. Las ventajas para estas aplicaciones radican en que el plástico protege la madera, aportando una mayor resistencia a la humedad, a los insectos y a los hongos de la pudrición (Lu *et al.*, 2000).

En México existen plantaciones forestales de *Eucalyptus nitens*, que poseen buenas características como resistencia al frío, rápido crecimiento, adaptabilidad a distintos sitios y excelente respuesta al manejo. El uso actual de esta especie es principalmente para pulpa

celulósica (Poblete, 2004). La densidad básica de la madera de *E. nitens*, es aproximadamente de 510 kg/m³, indica que esta especie tiene posibilidad de uso en la fabricación de chapas y tableros compuestos (Poblete, 2002). De acuerdo a las ventajas antes mencionadas, *E. nitens* es una especie que puede aprovecharse de manera integral para la producción de materiales a base de madera y plástico.

Por lo que el objetivo del presente trabajo es fabricar un material compuesto de polietileno de baja densidad y partículas de madera de *Eucalyptus nitens*, obtenido mediante un proceso de moldeo, analizando el efecto de la concentración y tamaño de partícula en el comportamiento físico y de resistencia mecánica del material.

2. ANTECEDENTES

2.1 Compuestos de madera y plástico (WPC)

El término compuesto o composites de madera-plástico se refiere a cualquier compuesto que se compone principalmente de una matriz de plástico (PE, PP, PET, etc.) reforzado con madera u otras fibras naturales, y otros aditivos que se agregan en pequeñas cantidades para mejorar el procesamiento y el rendimiento. Estos aditivos, tales como agentes de acoplamiento, estabilizadores, pigmentos, lubricantes, fungicidas y agentes espumantes se usan hasta cierto punto, y pueden generar productos con propiedades similares o mejores que los mismos plásticos sintéticos (Youngquist *et al.*, 1995; Jayaraman y Bhattacharyya, 2004; Rowell *et al.*, 1998).

Los materiales compuestos se forman mediante uniones no químicas de dos o más componentes, dando lugar a nuevas características o propiedades específicas. En la formación se deben considerar dos componentes: **la matriz**, que es el componente responsable de las propiedades físicas y químicas, además de la transmisión de los esfuerzos, sirve también de protección contra los agentes ambientales a los que pueda estar sometido el material compuesto (incluye polietileno, polipropileno, tereftalato de polietileno, entre otros); y **el refuerzo**, proporciona la resistencia a la tensión del elemento, provee resistencia y rigidez al mismo tiempo que la matriz mantiene las fibras juntas, transmitiendo el esfuerzo de una fibra a otra produciendo una estructura consolidada. Los materiales compuestos pueden ser repetidamente fundidos a 200 °C (Botero *et al.*, 2013; Clemons, 2002; Lu *et al.*, 2000; Youngquist, 1995).

El campo de los materiales compuestos se desarrolla de manera exponencial. Por las características de ligereza, fuerza y rigidez que presentan, los hacen competitivos con los materiales de ingeniería conocidos en la construcción (tableros a base de madera, de yeso y cemento) y por ello la importancia de generar cada vez más materiales con estas características.

El volumen de producción de productos plásticos que contienen madera y fibras aumenta considerablemente en todo el mundo (Bledzki *et al.*, 2005). Son usados para decoración y extensamente en la construcción; pasamanos de escaleras, tableros de suelo, para adornar cocinas y habitaciones, muelles de embarcaderos, terrazas, superficies de piscinas o en centros de recreación, perfiles y tubos. En general, los WPC permiten construir infraestructuras de

prolongada vida útil o de mayor duración donde actualmente la madera sin tratar no lo puede hacer (Li y Matuana, 2003; Bledzki y Gassan, 1999; Bledzki y Faruk, 2006).

Paris y González (2009), caracterizaron las propiedades mecánicas de materiales plásticos, elaborados con un polietileno de baja densidad reciclado y polipropileno. Mencionan que la caracterización de estos polímeros reciclados determina la importancia que esta tiene como paso inicial en el proceso productivo y que impacta directamente las propiedades físico - mecánicas finales del producto. El polietileno fue recolectado de una industria bananera. La estabilidad dimensional y de la resistencia de los compuestos puede ser mejorada aumentando el contenido del polímero o mediante la adición de agente acoplador. Según los resultados, el uso de polietileno es adecuado para la generación de compuestos plásticos.

En el estudio realizado por Klyosov (2007), menciona que los compuestos a base de madera y plástico que son elaborados con polímeros de baja densidad, presentan ciertas limitaciones si se elaboran con temperaturas superiores a 200°C, indica que para evitar la degradación de los materiales se debe acotar los tiempos de contacto de las fibras celulósicas y del polímero con el área donde se lleva a cabo la fundición del material (placas de calentamiento).

Xu (2007), reporta que las fibras naturales tales como sisal, lino, yute y fibras de madera producen un buen reforzamiento cuando están combinados correctamente con polímeros apropiados. En su estudio considero tres contenidos de la fibra, de 10%, el 30% y el 50% en peso. Los resultados demostraron que la densidad del material depende de los porcentajes usados. Se considera que es conveniente generar más combinaciones de la madera en cuanto a su composición en peso, ya que 3 niveles no arrojan datos suficientes en cuanto a la parte estadística que se genera para llevar a cabo una evaluación amplia del material compuesto.

De acuerdo a Espert (2004), las fibras de eucalipto y fibras de pino son favorables para el aprovechamiento en los materiales compuestos. La importancia de utilizar el aserrín reciclado es la de aprovechar la mayor cantidad del desperdicio que se genera en los aserraderos y madererías. Indica que la absorción de agua es una de las desventajas que presentan los compuestos de fibras de madera.

Rubyet (2010), observó el efecto que representan los contenidos de fibra al ser mezclados con un polietileno maleable (MAPE) sobre el procesamiento de materiales compuestos y las propiedades mecánicas. Los resultados muestran que al aumentar el porcentaje del polímero hasta en un 50% aumenta la resistencia de flexión.

Bouafif et al., (2009), investigaron los efectos que presenta la variabilidad de la fibra (tamaño y proporción) en las características mecánicas y físicas de compuestos madera-plástico. Las muestras las prepararon mediante moldeo por inyección. Reportaron que la variabilidad de la fibra de madera tiene un efecto significativo en las propiedades físicas de los materiales compuestos, y que este efecto se explica por las variaciones en las propiedades superficiales de las fibras, cristalinidad relativa, degradación térmica y gravedad específica de la madera. Indicaron que al aumentar el tamaño de las fibras se mejora la rigidez, pero reduce la elongación y la energía para romper en el proceso de moldeo, y que el efecto que tiene el tamaño de fibra en la absorción de agua es mínimo. Sin embargo, mencionaron que al aumento del contenido de fibra, aumenta la captación de agua.

McHenry (2003), estudió materiales compuestos de madera y plástico sin la incorporación de aditivos para determinar los efectos de fibra de madera sobre las propiedades mecánicas. Las materias primas usadas fueron la fibra de madera de eucalipto y la fibra de nylon. Las pruebas fueron realizadas para determinar el módulo de elasticidad. Encontró que la flexión de los compuestos disminuyó considerablemente al aumentar la cantidad de fibra de madera. Indicó que la importancia al desarrollar materiales compuestos sin aditivos, es para tener un acercamiento más real a los factores que influyen en las propiedades físicas y mecánicas de los materiales. Concluye que si se agregan aditivos, se estaría forzando el material compuesto con características más específicas y lo que se pretende es aprovechar lo existente, sin ningún tratamiento, para manipularlos después de obtener las propiedades mecánicas.

Solis y Lisperguer (2002), investigaron las características mecánicas de compuestos de madera-plástico, que fueron elaborados usando polietileno reciclado con el aserrín como relleno. Reportaron la influencia que tiene la adición de polvo de madera en las propiedades y características del polímero, así como los efectos que presentaron las proporciones de fibra de madera y la adición de un agente acoplador sobre las propiedades mecánicas, determinaron que el uso de un adecuado agente de acoplamiento mejora la compatibilidad entre la fibra y las

matrices plásticas, haciendo que las características mecánicas de los compuestos resultantes mejoren cuando se comparan con los productos vírgenes. Sin embargo, estos autores mencionan que el proceso mediante moldeo manual no es suficiente para obtener mezclas bien homogéneas, lo que claramente mejoraría usando una máquina extrusora-inyectora para plásticos.

2.1.1 Comercialización de los WPC

Los materiales compuestos llevan más de 25 años comercializándose en Estados Unidos y otros países europeos, en donde actualmente el mercado supera las 600000 ton/año (Leaversuch, 2000; Clemons, 2002). Estados Unidos, es el principal fabricante de WPC con casi la mitad de la producción mundial, seguido de China con 33%, mientras que los mercados de más rápido crecimiento, son: el sudeste Asiático, Rusia, América del Sur e India (Alcántara, 2015).

En México, existen empresas como Entabla, Ecolaminados, Plastimadera e Innover que se dedican a la elaboración, venta y distribución de materiales hechos de madera y plástico, además, han encontrado buena respuesta por el tema ecológico. Esta tendencia se debe a que existen grandes volúmenes de plástico que deben ser reciclados y a la facilidad para conseguir residuos de madera. Aunque la comercialización de materiales compuestos a base de madera y plástico ha sido lenta, las industrias de la construcción, la automotriz, bienes industriales y de consumo serán las que en los próximos años hagan crecer la demanda de WPC en todo el mundo, de acuerdo con la empresa de investigación de mercados “RnR Market Research”, que estima un valor de mercado de 4.602 millones de dólares americanos para maderas plásticas en el 2019 (Alcántara, 2015).

2.1.2 Fibras utilizadas en WPC

Las fibras naturales tales como el lino, algodón, yute, sisal, kenaf, y fibras de madera han sido usadas desde hace más de 6000 años a.c. Estas fibras son destinadas a la industria textil, tableros de partículas, tablas de aislamientos térmico y acústico, forraje y nutrición, cosméticos, medicinas y recursos para otros bio-polímeros, además, han sido consideradas como alternativa de refuerzo en compuestos a base de plástico. Las fibras presentan buenas propiedades mecánicas, son reciclables y biodegradables, de bajo costo y baja densidad. Sus principales desventajas en la elaboración y desempeño de compuestos poliméricos son la absorción de agua, formación de agregados e inestabilidad térmica. Las fibras naturales contienen 60-80% de

celulosa y 5-20% de lignina (Navarro, 2005; Westman *et al.*, 2010; Sullcahuamán *et al.*, 2007; Mihaela *et al.*, 2011).

2.1.3 Geometría de la partícula de madera

La geometría de las partículas tiene un efecto sobre las propiedades físicas y mecánicas de los tableros compuestos. El control de la geometría es fundamental durante el proceso de fabricación de nuevos materiales compuestos, ya que influye en diferentes maneras:

- a) **Largo de las partículas.** Al aumentar el largo de las partículas, el módulo de elasticidad (MOE) y el módulo de rotura (MOR) incrementan (Poblete, 2001). En la resistencia a la tracción perpendicular al plano, al aumentar el largo, esta decrece. Las propiedades físicas no se ven afectadas o esta afección es mínima, al decrecer el largo de las partículas el hinchamiento del espesor aumenta (Heebink y Hann, 1959).
- b) **Espesor de las partículas.** El espesor de partícula influye según en el tipo de resistencia que se mida al tablero. La resistencia a la flexión, baja al aumentar el espesor de las partículas (Poblete, 1985). Al aumentar el espesor de las partículas se mejora la resistencia a la tracción perpendicular al plano. La resistencia a la extracción de tornillos, cuando las partículas son excesivamente gruesas, se aumenta considerablemente esta resistencia (Post, 1961).
- c) **Ancho de las partículas.** El ancho de partícula influye significativamente sobre las propiedades de los tableros. La resistencia a la flexión presenta ligeros incrementos al aumentar el ancho. Pero cuando el ancho y el largo tienen valores semejantes, la flexión nuevamente decrece. La resistencia a la tracción perpendicular, se incrementa al aumentar el ancho de las partículas. El ancho de las partículas no tiene un efecto importante en las propiedades físicas de los tableros (Kusian, 1968).
- d) **Coefficiente de esbeltez.** El coeficiente de esbeltez es la relación determinada por el largo y el espesor de las partículas. Un aumento en el coeficiente de esbeltez de las partículas, mejora la resistencia de flexión. Y al disminuir el coeficiente de esbeltez, es decir incorporar al tablero partículas más cortas y gruesas, la resistencia a la tracción perpendicular al plano presenta un aumento positivo (Poblete, 1985).

2.1.4 Densidad

La densidad, es una magnitud escalar referida a la cantidad de masa en un determinado volumen de una sustancia. Según Echenique-Manrique y Plumpré (1994), las maderas presentan una densidad muy baja ($<0.26 \text{ g/cm}^3$) a extremadamente alta ($>0.9 \text{ g/cm}^3$). Mientras que Lincoln (2006), clasifica la densidad de excepcionalmente baja ($<0.30 \text{ g/cm}^3$) a excepcionalmente alta (1.0 g/cm^3) (Anexo 1).

En los últimos años, las fibras de madera han surgido como una alternativa de relleno o refuerzo para materiales ya que este permite cambiar la densidad de los compuestos, y a la vez se pueden mejorar las propiedades físicas y mecánicas, lo que permite calcular la densidad necesaria para obtener un producto que cumpla con las exigencias de las normas (Botero *et. al.* 2013).

La densidad de los compuestos de madera y plástico depende principalmente del contenido de madera, a medida que aumenta el contenido de fibras o partículas de madera, la densidad aumenta proporcionalmente de forma lineal, tanto para el polietileno (PE) como para el polipropileno (PP). El rango de densidades de los plásticos es relativamente bajo y se varía entre 0.9 y 2.3 g/cm^3 . La densidad de otros materiales es mayor, como el aluminio con densidad 2.7 g/cm^3 o el acero con 7.8 g/cm^3 (Beltrán y Marcilla, s/f).

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/cm^3 . Y el componente lignocelulósico que sirve como un refuerzo o de relleno tiene una densidad de 0.025 a 0.25 g/cm^3 . Paris y Gonzales (2009), realizaron mediciones de tipo experimental a un WPC, utilizando mediciones de volumen y pesos de las muestras. Obtuvieron una densidad de 0.683 g/cm^3 para un compuesto a base de madera mezclado con un polietileno de baja densidad. Mientras que Klyosov (2007), reporto densidades en un rango de 0.91 - 0.95 g/cm^3 en compuestos a base de madera y plástico. Indican que la densidad es controlable a través de la adición de agentes de acoplamiento. Esto a su vez contribuye a disminuir la absorción de agua de los materiales compuestos.

2.1.5 Absorción de agua e hinchamiento del espesor

Klyosov (2007), indica que los materiales de WPC absorben cantidades variables de humedad. Cuando los WPC se sumergen en el agua, absorben humedad típicamente entre 0.7 y 3.0% en peso después de 24 h de la inmersión. Este valor es bajo al ser comparado con la absorción de agua en la madera, 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.

Como se puede observar, las concentraciones de materiales (madera-plástico) y el tamaño de las fibras, son importantes en la etapa inicial del proceso productivo de compuestos y afectan directamente las propiedades físicas y mecánicas del producto (París y González, 2009).

2.1.6 Dureza

La dureza es la resistencia que opone un cuerpo al ser penetrado por otro sólido, se han diseñado algunos métodos como dureza Janka, Brinell entre otros (Sánchez y Bocanegra, 2006). Para determinar la dureza Janka, se introduce una semiesfera en el material y se mide la carga. La semiesfera tiene 1 cm^2 de área. Para la determinación de la dureza Shore D se utiliza un durómetro digital, generalmente utilizado 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 permite obtener la dureza de forma directa expresada en escala Shore D (HD). Raya (2014), determino la dureza Shore D en un material compuesto de fibras de madera y polietileno de baja densidad, obtuvo valores de 63 HD a 76 HD, además, obtuvo valores de dureza para diferentes tipos de tableros (Anexo III).

2.1.7 Extracción de tornillos

Este ensayo consiste en medir la fuerza necesaria para extraer un tornillo del material. Los tornillos son elementos que comúnmente se utilizan para realizar ensambles en construcciones. Existen tornillos de muchos tipos, tamaños y formas que están sometidos a cargas de extracción, cargas laterales o combinaciones de estas dos (Flores *et al.*, 2009).

La dureza a la extracción de tornillos está directamente influenciada por el espesor de las partículas, cuando las partículas son excesivamente gruesas, se aumenta considerablemente la resistencia a la extracción de tornillos (Post, 1961). Por ello es importante realizar este tipo de ensayo en la industria de la construcción a modo de control de calidad (Poblete *et al.*, 1994).

Raya (2014), determino la resistencia a la extracción de tornillos en un material compuesto de fibras de madera y polietileno de baja densidad, encontró valores de 42–55 kg, además, obtuvo valores de resistencia para diferentes tipos de tableros a base de madera (Anexo IV).

2.1.8 Resistencia a la flexión estática

La flexión estática es uno de los esfuerzos al que se someten los elementos en la construcción, la resistencia se mide aplicando una carga concentrada en el centro de la longitud del material apoyada en sus extremos; cuando se flexiona el material, se presentan a la vez dos tipos de esfuerzos en el espesor de la pieza; en la parte superior de compresión, y en la inferior de tensión, también la diferencia en la intensidad de estos esfuerzos según su distanciamiento del eje medio se producen esfuerzos por cortante (Sánchez y Bocanegra, 2006).

Las propiedades de resistencia a la flexión de los WPC dependen del tipo de polímero y del contenido de madera usado para fabricar el compuesto. Las estrategias utilizadas por los fabricantes para reducir los costos incluyen maximizar la cantidad de madera utilizada en el material compuesto. Cuanto mayor es el contenido de la madera, mejores serán las propiedades de rigidez de los compuestos (Gardner y Murdock, 2010). Es por ello, que existe una variabilidad de los valores de resistencia a la flexión, principalmente cuando se utilizan concentraciones diversas y especies maderables diferentes en la fabricación de estos compuestos. Por ejemplo, Youngquist *et al.*, (1992), presentan una serie de datos de las propiedades mecánicas en paneles compuestos para tres diferentes formulaciones de fibras de madera y resina fenólica, encontrando que con un 10% de polietileno y un 90 % de fibra de madera, se tiene una flexión estática de 23.3 MPa.

Bouafif *et al.*, (2009), investigaron los efectos de la variabilidad del tamaño de fibra y el contenido sobre las propiedades mecánicas de compuestos de plástico-madera, obteniendo un MOE de 38.5 MPa. Mientras que, Paris y González (2009) presentaron un documento que hace referencia a los materiales plásticos reciclados (Polietileno de Baja Densidad, y Polipropileno),

los cuales se emplean para la elaboración de madera plástica. Este documento menciona que los compuestos de madera con polietileno de baja densidad, presentan una resistencia a la flexión de 14.01 MPa en la sección longitudinal y 11.61 MPa en sección transversal, mientras que el MOE presento un valor de 422.3 MPa en sección longitudinal y 359.21 MPa en sección transversal. Rubyet (2010), obtuvo un MOE de 16.5 MPa de un compuesto hecho a base de madera con un polietileno de baja densidad, obtenido mediante moldeo por compresión. Concluye, que al aumentar la proporción de madera disminuye el MOE. Moya *et al.*, (2012) determinaron las propiedades físicas y mecánicas de compuestos de polietileno con harinas de madera de pino mediante un proceso de moldeo por inyección, los resultados obtenidos en el compuesto de madera-plástico para el MOE fue de 55.46 MPa.

Moreno *et al.*, (2011), caracterizaron las propiedades mecánicas de compuestos de madera y plástico. Obteniendo que un polietileno al ser mezclado con fibra de madera de pino radiata de malla 60 con concentraciones de fibra al 15% y 25% en peso, presentaron un MOE de 39 MPa y 100 MPa, respectivamente. Con la incorporación de un agente acoplante mejoraron la resistencia a 159 MPa y 200 Mpa, y aumentaron la rigidez del material compuesto. Solis y Lisperguer (2002), al realizar un estudio de compuestos mixtos a base de plásticos y madera, utilizaron dos especies maderables (pino y raulí) en una proporción en porcentaje de madera y plástico (10:90 y 20:80) encontraron un MOE de 7788- 6233 kg/cm², indicando claramente que se aumenta la rigidez del material al agregarle polvo de madera. Mano *et al.*, (1994) desarrollaron madera plástica de residuos urbanos reciclado, dentro del proyecto utilizaron 3 diferentes especies maderables, obteniendo así una resistencia la flexión con el relleno de cedro de 715 kg/cm², para la mezcla de pino de 825 kg/cm², y finalmente para la mezcla de peroba de 1268 kg/cm², concluyen que esta última especie tuvo un la resistencia alta comparada con las otras dos especies, debido principalmente a la alta densidad que presento el compuesto final al incorporar dicha especie.

2.1.9 Métodos para formar los WPC

Lu *et al.*, (2000), Gardner y Murdock, (2010), Rivzi *et al.*, (2008), mencionan que los compuestos de madera y plástico se forman mediante **extrusión**, 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. Según Mariano (2011),

Bledzki y Faruk, (2006), la técnica consiste en hacer pasar un material termoplástico bajo la acción de temperatura y la presión a través de un orificio con forma más o menos compleja, de tal manera que, el material adquiera una sección transversal igual a la del orificio (Figura 1).

Existen otros métodos de conformado, según Mariano (2011), el de **inyección** de termoplásticos que es un proceso físico y reversible, donde se funden los componentes madera-plástico, 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 2).

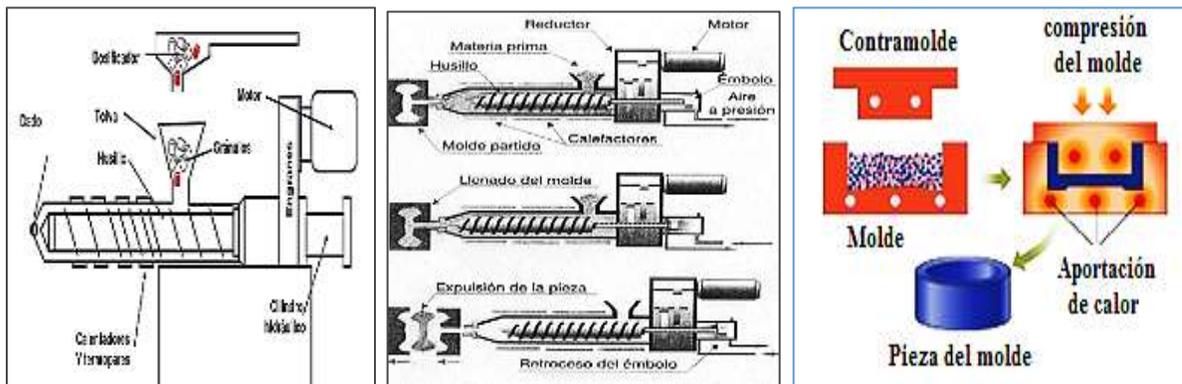


Figura 1. Extrusión de WPC. **Figura 2.** Proceso de inyección. **Figura 3.** Moldeo por compresión.

El método de moldeo por compresión, es de los más difundidos para la producción de compuestos de madera y plástico, y es el método menos costoso (Figura 3), en esta técnica se utiliza comúnmente fibras naturales (yute o henequén) además de la harina de madera (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 (180 °C) y presión (4.44 MPa) para forzar al material a entrar en contacto entre los moldes para obtener la forma deseable de materiales fundidos a través de la solidificación (Barone *et al.*, 2005; Tornqvist *et al.*, 2000). Es el método más conveniente para la evaluación rápida de las formulaciones de materiales (Facca *et al.*, 2006). Y es el que se utilizó en la presente investigación.

Existe también el moldeo por contacto, este consiste en utilizar tan sólo un molde. Los moldes se hacen generalmente de resina poliéster reforzada con fibra de vidrio, un molde de este tipo resulta fuerte y ligero. Existen investigaciones que han utilizado este método de moldeo, debido principalmente a los bajos costos que representa. Por ejemplo, Bouafif *et al.*, (2009) investigaron los efectos de la variabilidad de la fibra, el tamaño y el contenido sobre las propiedades mecánicas y físicas de compuestos plásticos de madera obtenidos mediante moldeo. Obteniendo que, todas las propiedades analizadas varían significativamente con el origen de la fibra. Menciona además que, un tamaño de la fibra superior produce una mayor resistencia y elasticidad, y la proporción de fibra mejora la resistencia y la rigidez de la elongación. Por otro lado, Paris y González (2009), obtuvieron un compuesto de perfil geométrico preestablecido a partir de plásticos reciclados (polietileno de baja densidad, y polipropileno) con fibras de madera utilizando este mismo proceso de moldeo.

2.2 Plásticos

Los plásticos son materiales orgánicos que contiene como elemento principal el carbono, combinado con otros elementos como el hidrogeno, oxígeno y nitrógeno. Los plásticos se dividen en 3 tipos: termoplásticos, termoestables y elastómeros.

2.2.1 Termoplásticos: De acuerdo a Cornish (1997), son plásticos que al ser calentados sus relaciones intermoleculares se debilitan y se vuelve más suaves. Esto hace que se puedan moldear fácilmente por diferentes métodos. Cuando el material se enfría, se endurece y vuelve a su estado normal. El proceso de moldeo es reversible, el material no se descompone y puede utilizarse para una nueva fabricación. Ejemplos de termoplásticos son:

2.2.1.1 Polietileno (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 es una especie

de goma a temperatura ambiente y se convierte en un cristal con una cierta temperatura de transición vítrea (Klyosov, 2007). Este polímero se divide en dos tipos:

- a) Polietileno de baja densidad (PEBD), es probablemente el polímero que más se ve en la vida diaria. Es el plástico más popular del mundo. 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. Es un material versátil, tiene la estructura 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). La densidad disminuye a medida que aumenta el número de puntos de ramificación en las cadenas del PE. La cantidad de insaturaciones en el PE también aumenta con la disminución de la densidad. Por ejemplo, un número medio de ramas de metilo por 1000 carbonos en PEBD aumentó desde 0.916 a 0.922 g/cm³ a 43°C. Por lo tanto, la sensibilidad del PE a la oxidación aumenta a medida que disminuye su densidad. El PEBD es más vulnerable a la oxidación en comparación con el polietileno de alta densidad. Por el contrario, PEBD se oxida de manera bastante uniforme en comparación con el de alta densidad, las áreas amorfas se oxidan más rápidamente que las cristalinas. El PEBD típicamente tiene ramificación lateral larga de la cadena molecular principal y por lo tanto es un polímero más amorfo. Como resultado, muestra una menor contracción a un PEAD más cristalino, en el que muchas de las moléculas poliméricas están muy juntas. De un material a la deformación, la indentación y la resistencia a la abrasión, el PEBD presenta menores valores comparado con el de PEAD. La temperatura máxima de fusión del PEBD se considera de 71°C y para el PEAD de 82°C.
- b) Polietileno de alta densidad (PEAD), 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. Algunas de sus aplicaciones son, botes de aceites automotores, champú, lácteos, bolsas para supermercados, refrescos, cervezas, botes de pintura, helados, tuberías para gas,

telefonía, agua potable, minería, láminas de drenaje y uso sanitario (Cervantes *et al.*, 2006; Enderle, 2008).

2.2.1.2 **Tereftalato de polietileno (PET)**, está hecho de petróleo crudo, gas y aire. Un kilo de PET está compuesto por 64% de petróleo, 23% de derivados líquidos del gas natural y 13% de aire. El PET actúa como barrera para los gases (CO₂, humedad y el O₂), es transparente, cristalino, irrompible, liviano e impermeable, presenta alta rigidez y dureza, alta resistencia química y buenas propiedades térmicas, posee una gran indeformabilidad al calor y buena estabilidad a la intemperie, tiene alta resistencia al plegado y baja absorción de humedad, que lo hace muy adecuado para la fabricación de compuestos con fibras (Platt *et al.*, 2005).

2.2.1.3 **Polipropileno (PP)**, 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, es utilizado en una amplia variedad de aplicaciones que incluyen empaques para alimentos, tejidos, equipo de laboratorio, componentes automotrices y películas transparentes. Tiene gran resistencia contra diversos solventes químicos, así como contra álcalis y ácidos (Cervantes *et al.*, 2006).

2.2.2 **Termoestables:** Son aquellos grupos de plásticos que no sufren deformaciones al ser calentados. Una vez que estos adquieren una rigidez no pueden volverse a deformar. Se presentan mayormente en forma líquida o viscosa (resina) y al añadirle un catalizador se efectúa el proceso de polimerización (Cornish, 1997).

2.2.3 **Elastómeros:** Son aquellos que se ubican muchas veces dentro de los termoestables. Son un grupo de material de origen sintético que tiene la cualidad de elongación hasta 30 veces su tamaño normal, pudiendo regresar a su tamaño normal sin producir algún cambio en él. Existen elastómeros termoestables y elastómeros termoplásticos, ambos con gran capacidad de elongación (Cornish, 1997).

2.3 Generalidades de *Eucalyptus nitens*

Eucalyptus nitens (Deane & Maiden) es una especie de alta capacidad de reproducción y/o desarrollo, presenta un mayor crecimiento volumétrico (con edades de rotación de 8 a 14 años de edad) que otras especies, tiene una gran capacidad de adaptación a diversos sitios. En Chile, ocupa el segundo lugar en importancia después de *E. globulus* (Borgoño, 2006).

a) Clasificación taxonómica de *Eucalyptus nitens*

- Nombre científico: *Eucalyptus nitens*
- Nombre común: Eucalipto brillante, *Shining gum* en Australia y *nitens* en Chile.
- Familia: Myrtaceae
- Género: *Eucalyptus*
- Clase: Magnoliopsida
- Subclase: Dicotiledóneas
- Sinonimia: *Eucalyptus goniocalyx var. nitens*

b) Descripción botánica

E. nitens (Figura 1) es un árbol grande que en su hábitat natural alcanza de 60 hasta los 90 m de altura, con diámetros de 1 a 2 m, con fuste recto. La corteza es persistente en la parte baja del tronco, de color gris a café grisáceo, es fibrosa y escamosa, lisa en la parte exterior. Sus hojas son opuestas, ovaladas a elípticas y las hojas adultas son alternas, estrechas, pecioladas y lanceoladas, de 15 a 25 cm de largo y de 1.5 a 2.5 de ancho. Las flores se presentan agrupadas en inflorescencias e infrutescencias respectivamente en número que oscila entre cinco y siete, el pedúnculo es estrechamente aplanado, florece entre febrero y marzo. El fruto es cilíndrico ovoide de 4 a 7 mm de largo y de 4 a 6 mm de diámetro (FAO, 1981; Universidad de Vigo, 2014; Garibay *et al.*, 2013).

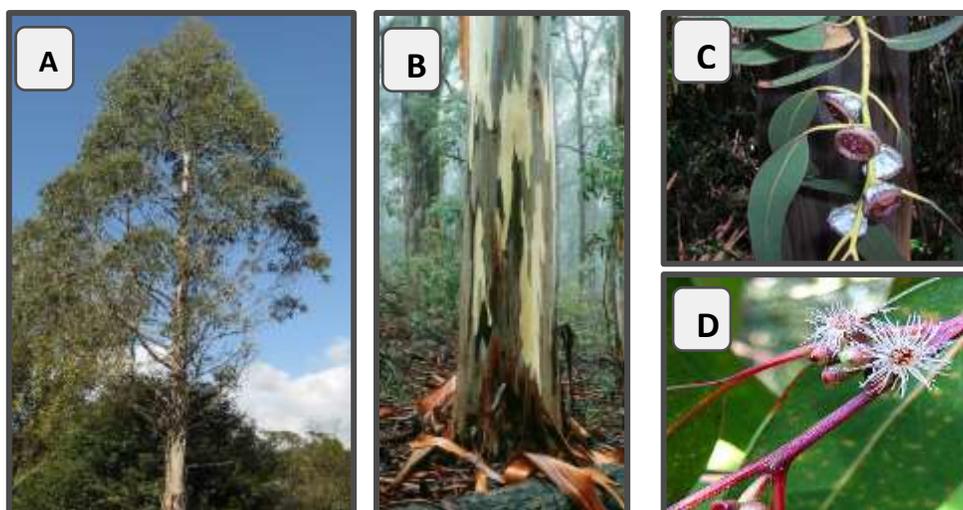


Figura 4. *Eucalyptus nitens*: A) Árbol, B) Corteza, C) Hojas y Fruto, D) Flores

c) Distribución geográfica

Existen 187 millones de hectáreas de plantaciones de bosques a nivel mundial de las cuales 18.7 millones de hectáreas corresponden al género *Eucalyptus* abarcando más de 700 especies ubicadas principalmente en Australia, Indonesia, Nueva Zelanda, Portugal, España, Brasil, Uruguay y Chile, con proyecciones de seguir incrementando hasta el 2020. *Eucalyptus nitens* es una especie nativa del Sudeste de Australia y Tasmania, así como de Indonesia y Mindanao (INFOR, 2005; Prado y Barros, 1991).

d) Propiedades físicas y morfológicas

E. nitens presenta menor densidad que *Eucalyptus globulus*. La densidad de esta especie depende de la zona geográfica en donde se ha desarrollado y principalmente la edad, tal como se aprecia en el cuadro 1.

Cuadro 1. Variación de la densidad en función de la edad de árboles de *Eucalyptus nitens*

<i>Eucalyptus nitens</i>	5 años	8 años	11 años	12 años
Densidad (kg/m ³)	430	447	448	490-510

Fuentes: (Reyes, 2005; Gorrini *et al.*, 2004; Garibay *et al.*, 2013).

La madera de eucalipto tiene un bajo contenido de extraíbles, según la especie, y que influyen en la permeabilidad, densidad básica, dureza y en la resistencia a la compresión de la madera

(Barahona 2005 citado por Casimiro 2015). El contenido de extraíbles aumenta a medida que aumenta la edad del árbol, teniendo un contenido promedio de extraíbles de 0.43% a los 7 años y un 0.72% a los 13 años (Peredo, 2000).

El *Eucalyptus nitens* presenta parénquima leñoso, paratraqueal vasicéntrico y apotraqueal difuso. Su porosidad es semicircular, poros en forma elíptica, solitarios en su mayoría, en cadena radial de 2 a 3 y múltiples tangenciales de 2 (Garibay, 2015). El *Eucalyptus nitens* a los 8 años de crecimiento tiene un largo de fibra de 0.82 mm, y a los 11 años tiene un largo de fibra de 0.88 mm. A partir de los 15 años tiene un largo de fibra de 0.78 mm, un ancho de 12.4 μm y un espesor de fibra de 6.6 μm . A los 16 años presenta un largo de fibra de 0.95 mm, un ancho de fibra de 14.1 μm , y un espesor 7.4 μm (Kibblewhite *et al.*, 2000a; 2000b).

Los elementos de vaso son cortos (151-280-434 μm) con puntuaciones areoladas alternas, platinas de poco inclinadas a muy inclinadas con perforaciones simples (Garibay, 2015). La proporción de vasos existentes en *Eucalyptus nitens* disminuye a medida que aumenta su edad, es de 50% a partir de la altura comercial, esta variación afecta en el proceso de pulpaje ya que mientras mayor sea el número de vasos mejor será la penetración del licor en el pulpaje kraft, por el contrario un bajo espesor de pared de las fibras incide en un colapso de las fibras. Esto radica en qué, a un mayor crecimiento del árbol, el diámetro del vaso se incrementa, esto hace que la madera en si sea más permeable (Peter *et al.*, 1998).

3. JUSTIFICACIÓN

Los materiales compuestos de madera-plástico presentan propiedades ventajosas (acabados, ligereza, factibilidad de procesamiento). En un material compuesto con madera y plástico, la madera permitirá: mayor densidad, mayor resistencia a la extracción de tornillos, menos pandeo, reducirá el ruido en temporadas de lluvias (si su uso es para techumbre), mayor rigidez, mejora sus propiedades térmicas y aporta estabilidad dimensional. El plástico protege a la madera contra el ataque de insectos y hongos de la pudrición, evita sus cambios dimensionales por efecto de la humedad (absorción de agua e hinchamiento en su espesor). Estos materiales compuestos pueden ser atornillados, taladrados o aserrados de la misma forma que la madera sólida, permitiendo así ampliar sus campos de aplicación (English *et al.*, 1997; Mankowski y Morrell, 2000; Wambua *et al.*, 2003; Stark y Rowlands, 2003). Sin embargo, los compuestos madera-plástico presentan ciertos inconvenientes, al no utilizar el tipo de madera y tipo de plástico adecuado, así como las proporciones adecuadas de los materiales, estos materiales pueden ser frágiles y tener poca resistencia (Faruk *et al.*, 2007; Klyosov, 2007).

En México, así como en algunos países sudamericanos, el uso de la especie de *Eucalyptus nitens* ha despertado un interés en cuanto a sus propiedades de uso y aprovechamiento al ser ésta una especie de rápido crecimiento. La densidad básica de la madera de *Eucalyptus nitens* (510 kg/m³) indica que esta especie tendría un potencial de uso en la fabricación de tableros compuestos (Poblete, 2002).

En ese sentido puede resultar interesante introducir la madera de *Eucalyptus nitens* con una densidad básica de 490 a 510 kg/m³ a los 8 años de edad (Garibay, 2015) como una alternativa de relleno para el plástico, y así poder visualizar las eventuales posibilidades de fabricar compuestos que sean competitivos y alcancen su pleno potencial en el mercado convencional como uso estructural o industrial.

4. HIPÓTESIS

- La matriz plástica evitará la absorción de agua de la madera de *Eucalyptus nitens* evitando el hinchamiento y la pudrición de la misma.
- Las combinaciones y el tamaño de partícula de *Eucalyptus nitens* influyen en las propiedades físico-mecánicas del material compuesto.

5. OBJETIVOS

Objetivo general.

Fabricar y evaluar física y mecánicamente un material compuesto a base de partículas de madera de *Eucalyptus nitens* y plástico (polietileno de baja densidad).

Objetivos particulares.

Analizar el efecto de las proporciones (plástico-madera) y el tamaño de partícula de la madera en el material compuesto, en relación a:

- La densidad
- La absorción de agua e hinchamiento del espesor
- La dureza Shore D (HD)
- La dureza Janka
- La resistencia a la extracción de tornillos
- La resistencia a la flexión estática

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Desarrollo del diseño experimental

Se desarrolló un método que permitiera buscar la combinación de los niveles óptimos para cada uno de los factores; para determinar si los factores afectan o no las características del compuesto elaborado, y si existe o no interacción entre cada uno. Para ello:

1. Se seleccionó un diseño experimental con dos factores: Factor MP (madera-plástico) y Factor T (tamaño de partícula), a tres niveles cada uno (cuadro 2), para las pruebas físicas y mecánicas.

Cuadro 2. Factores y niveles considerados en el diseño experimental

Factores	Niveles
MP: Proporciones (madera-plástico)	MP ₁ ; 20-80 %
	MP ₂ ; 40-60 %
	MP ₃ ; 60-40 %
T: Tamaño de partícula	T ₁ ; 1680 μm
	T ₂ ; 2380 μm
	T ₃ ; 4760 μm

2. Los niveles de MP se designaron por MP₁, MP₂ y MP₃, los de T por T₁, T₂ y T₃, respectivamente. El Cuadro 3, muestra los elementos principales de este experimento.

Cuadro 3. Tratamientos del diseño experimental

1	2	3	4	5
Corrida experimental	Factor MP	Factor T	Combinación de tratamientos	Respuestas
1	MP ₁	T ₁	M ₂₀ P ₈₀ ; T ₁₆₈₀	Y _{1,1}
2	MP ₂	T ₁	M ₄₀ P ₆₀ ; T ₁₆₈₀	Y _{2,1}
3	MP ₃	T ₁	M ₆₀ P ₄₀ ; T ₁₆₈₀	Y _{3,1}
4	MP ₁	T ₂	M ₂₀ P ₈₀ ; T ₂₃₈₀	Y _{1,2}
5	MP ₂	T ₂	M ₄₀ P ₆₀ ; T ₂₃₈₀	Y _{2,2}
6	MP ₃	T ₂	M ₆₀ P ₄₀ ; T ₂₃₈₀	Y _{3,2}
7	MP ₁	T ₃	M ₂₀ P ₈₀ ; T ₄₇₆₀	Y _{1,3}
8	MP ₂	T ₃	M ₄₀ P ₆₀ ; T ₄₇₆₀	Y _{2,3}
9	MP ₃	T ₃	M ₆₀ P ₄₀ ; T ₄₇₆₀	Y _{3,3}

Cada una de las 9 filas es una corrida experimental base, la segunda y tercera columnas constituyen lo que se controló en el experimento (proporciones y tamaño de partícula). La cuarta columna es una representación simbólica de cada combinación de niveles de ambos factores y

cada uno de sus elementos es una combinación de los 9 tratamientos, como se muestra a continuación:

1. **MP₁; T₁**: madera-plástico (20-80%); tamaño de partícula (1680 μm)
2. **MP₂; T₁**: madera-plástico (40-60%); tamaño de partícula (1680 μm)
3. **MP₃; T₁**: madera-plástico (60-40%); tamaño de partícula (1680 μm)
4. **MP₁; T₂**: madera-plástico (20-80%); tamaño de partícula (2380 μm)
5. **MP₂; T₂**: madera-plástico (40-60%); tamaño de partícula (2380 μm)
6. **MP₃; T₂**: madera-plástico (60-40%); tamaño de partícula (2380 μm)
7. **MP₁; T₃**: madera-plástico (20-80%); tamaño de partícula (4760 μm)
8. **MP₂; T₃**: madera-plástico (40-60%); tamaño de partícula (4760 μm)
9. **MP₃; T₃**: madera-plástico (60-40%); tamaño de partícula (4760 μm)

Finalmente, la última columna (5) son las respuestas evaluadas (propiedades físicas y mecánicas), como resultado de cada corrida experimental. Se utilizaron 3 réplicas por tratamiento, dando así un total de 27 corridas. Para fines comparativos, se elaboraron y utilizaron 3 muestra testigo al 100% del plástico de baja densidad para cada uno de los ensayos realizados.

6.2 Preparación de la materia prima

6.2.1 Partículas de *Eucalyptus nitens*

Para la elaboración del material compuesto, se utilizó la madera de *Eucalyptus nitens* de 8 años de edad, donada por la empresa Forestaciones Operativas de México S.A de C.V. Su densidad promedio fue de 0.447 g/cm³. El material fue extraído del predio el Chilacayote, municipio de Maravatio, Michoacán, se localiza al Noreste del Estado entre las coordenadas 19° 54'' latitud Norte y 100° 27'' longitud Oeste a 2020 msnm.

La obtención de los tres tamaños de partícula (Figura 5) se realizó de la forma siguiente:

- a) **Cepillado.**- se usó una regruesadora o cepillo para desfibrar la madera de *E. nitens*.
- b) **Molienda.**- se utilizó un molino TOR-REY de 3/4 hp para la obtención de los diferentes tamaños de partículas.
- c) **Tamizado.**- se usaron tres tipos de mallas de acero inoxidable con aperturas de 1680 μm (malla 12), 2380 μm (malla 8) y 4760 μm (malla 4) para el control de partícula.



Figura 5. Proceso de molienda y tamizado de partículas de *Eucalyptus nitens*

- d) **Clasificación.** De la separación se obtuvieron los siguientes tipos de partícula de acuerdo al número de malla empleado, (Figura 6)



malla 12 (1680 µm)

malla 8 (2380 µm)

malla 4 (4760 µm)

Figura 6. Tipos de tamaños de partícula obtenidos por las diferentes mallas

6.2.2 Plástico de baja densidad

Se utilizó un polietileno de baja densidad (PEBD). Su densidad fue de 0.563 g/cm^3 y su granulometría fue de 2380 µm . Es un plástico flexible, liviano, impermeable, no tóxico, tenaz (incluso a temperaturas bajas), estabilidad dimensional regular, es de fácil procesamiento y de bajo costos (Figura 7).



Figura 7. Polietileno de baja densidad (PEBD)

6.3 Elaboración del material compuesto

6.3.1 Proporciones de madera y plástico

Para efecto del control de las proporciones (masa: masa) de la materia prima se utilizó una balanza digital (Figura 8).



Figura 8. Control de las proporciones de madera y plástico

Se realizaron 27 combinaciones (madera-plástico) para cada uno de los ensayos a desarrollar, y 3 muestras testigo al 100% del plástico de baja densidad para cada ensayo.

6.3.2 Método de moldeo por compresión

Se realizó una homogenización manual de cada tratamiento, en un molde. Estas combinaciones se llevaron a un proceso de moldeo por compresión (Figura 9), donde a través de una placa de calentamiento se les proporcionó el calor directamente en contacto del molde (Figura 10). Después de 20 minutos se tomó la temperatura (medidor de temperatura láser) de la superficie expuesta directamente al molde y a la superficie con la mezcla (Figura 11). Alcanzada la temperatura de 120°C, el material se mantuvo durante 10 minutos más.

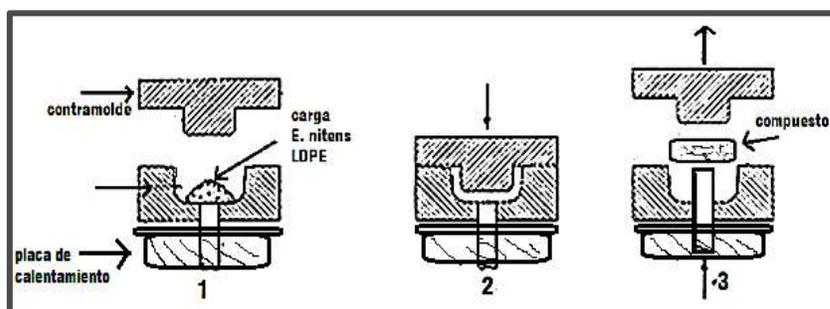


Figura 9. Método de moldeo para compuestos de *Eucalyptus nitens* con PEBD



Figura 10. Placa de calentamiento



Figura 11. Registro de la temperatura

6.3.3 Prensado del material compuesto

El prensado se realizó de dos formas:

1. En el primer prensado, la mezcla de los dos componentes (madera-plástico), una vez homogénea, se colocó en un segundo molde. El segundo molde se colocó sobre una prensa TRUPER de 20 toneladas, a un tiempo de 20 minutos con una carga de 20 kg/cm^2 (39.2 N). La Figura 12 muestra el proceso de prensado en esta etapa.
2. El segundo prensado se realizó de forma directa en el molde que contenía la mezcla de los dos componentes (madera-plástico), una vez unida homogéneamente, se colocó un contramolde, para los ensayos de flexión ($2 \times 2 \times 20 \text{ cm}$), de la misma forma, este fue llevado a la prensa durante 20 minutos con una carga de 20 kg/cm^2 (39.2 N) (Figura 12).

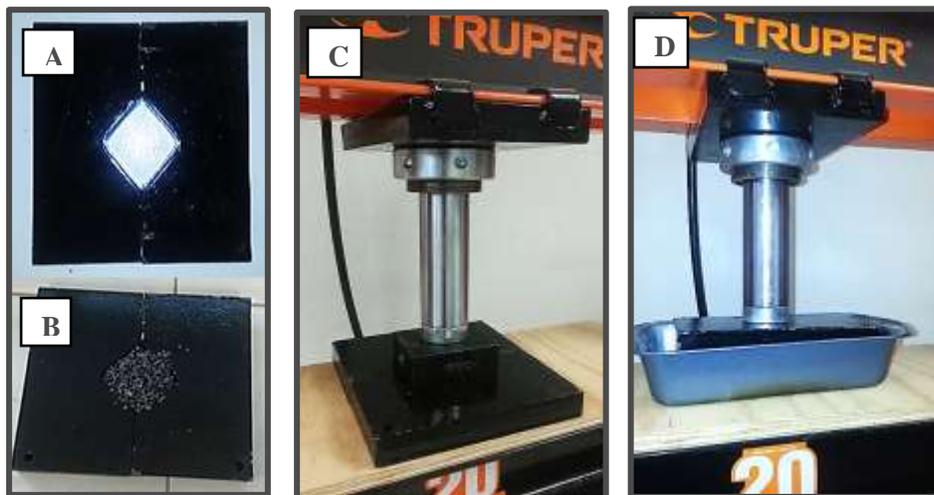


Figura 12. Proceso del prensado A) molde B) vaciado de la mezcla C) Prensado D) Prensado directo

6.3.4 Dimensionado de las probetas

El dimensionado de las probetas se realizó con la finalidad de eliminar impurezas presentes sobre la superficie de las mismas, además permitió dimensionar el material a los requerimientos establecidos por las normas ASTM (D-1037) para cada uno de los ensayos. Se utilizó una sierra circular de banco y escuadradora de tableros ROBLAND® ubicadas en el área de Física y Mecánica de la Madera de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera (Figura 13).



Figura 13. Maquinaria para el dimensionado de probetas

6.4 Evaluación física y mecánica del compuesto de madera-plástico

Se realizaron los ensayos de la densidad, la absorción de agua y el hinchamiento del espesor; además la dureza Shore D (HD), dureza Janka, resistencia a la flexión estática y la resistencia a la extracción de tornillos, como muestra la Figura 14.

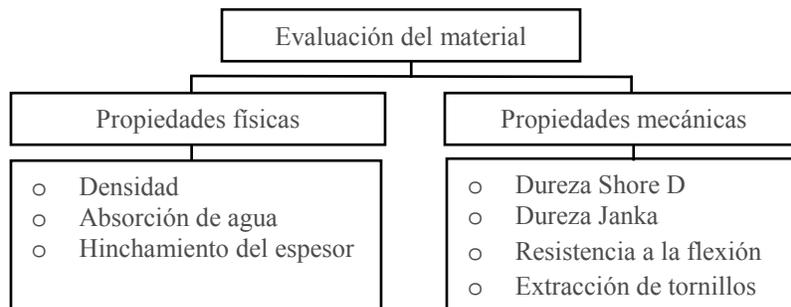


Figura 14. Evaluación física y mecánica del material compuesto

6.4.1 Determinación de la Densidad

La densidad es el cociente entre la masa y volumen de un cuerpo. El procedimiento para determinar la densidad fue el siguiente:

- a. Se determinó la masa de las 27 probetas y de 3 probetas testigo (100% plástico) en una balanza digital. Las dimensiones fueron de 5x5x2 cm (Figura 15).
- b. Para la determinación del volumen, se utilizó un vernier para medir en sus tres dimensiones (largo, ancho y espesor) cada una de las probetas (Figura 15).



Figura 15. Determinación de la densidad de probetas fabricadas con partículas de *Eucalyptus nitens* y PEBD

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

$$\rho = \frac{m}{v} \quad \text{Fórmula (1)}$$

Donde:

ρ = Densidad

m = Masa

v = Volumen

6.4.2 Determinación del hinchamiento del espesor y absorción de agua

a) Determinación del hinchamiento del espesor

El procedimiento para determinar el hinchamiento se ajustó a la norma ASTM (D-1037), y fue el siguiente:

1. Se utilizó un total de 27 probetas y 3 probetas testigo (100% plástico), con dimensiones de 5x5x2 cm.
2. Con un micrómetro, a cada probeta se le determinó el espesor, en un mismo punto, antes y después de una inmersión en agua a 2, 12, 24 y 72 horas (Figura 16).



Figura 16. Ensayos de hinchamiento del espesor y absorción de agua.

El hinchamiento del espesor se obtuvo con la siguiente fórmula:

$$\%He = \left[\frac{e_f - e_i}{e_i} \right] 100 \quad \text{Fórmula (2)}$$

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.

El procedimiento para determinar la absorción de agua se ajustó a la norma ASTM (D-1037), y fue el siguiente:

1. Se utilizó un total de 27 probetas y 3 probetas testigo (100% plástico), con dimensiones de 5x5x2 cm.
2. A cada probeta se le determinó el peso antes y después de inmersión en agua a 2, 12, 24 y 72 horas. Este ensayo de absorción de agua se realizó a temperatura de 25 °C (Figura 16).

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

$$\%A_b = \left[\frac{P_2 - P_1}{P_1} \right] 100 \quad \text{Fórmula (3)}$$

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)

6.4.3 Determinación de la dureza Shore D

Para la determinación de la dureza, se utilizó un durómetro digital Phase II ®. El procedimiento se realizó de acuerdo al método utilizado por Raya (2015) y fue el siguiente:

- a) Se utilizó un total de 27 probetas y 3 probetas testigo (100% plástico), con dimensiones de 5x5x2 cm.
- b) Se colocó el durómetro sobre la superficie de cada una de las probetas y se registraron 3 lecturas por ambas caras (Figura 17).



Figura 17. Ensayo de la dureza Shore D (HD)

6.4.4 Determinación de la dureza Janka

El procedimiento para determinar la dureza Janka se ajustó a la norma ASTM (D 1037), y fue el siguiente:

- a) Se utilizó un total de 27 probetas y 3 probetas testigo (100% plástico), con dimensiones de 5x5x2 cm.
- b) Se utilizó una máquina universal Shimadzu ®, con capacidad de 10,000 kg. Se introdujo una semiesfera que proyecta 1 cm² de área en cada una de las probetas, y se midió la carga en kg/cm² (Figura 18).



Figura 18. Ensayo de la dureza Janka

6.4.5 Ensayo de extracción de tornillos

Este ensayo se realizó de acuerdo a la norma ASTM (D 1037). Se usó una máquina universal Shimadzu ® (Figura 19), 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 27 probetas de 5x5x2 cm. Posteriormente las probetas fueron perforadas en una cara con una broca de 2 mm de diámetro. Se utilizaron tornillos galvanizados del No. 10 de cabeza fijadora, con medidas de 1 1/2" (10 mm de diámetro por 38 mm de largo) (Figura 20). Los tornillos fueron instalados en las perforaciones con un desarmador hasta una profundidad aproximada de 30 mm. La velocidad de carga aplicada por la máquina fue de 6 mm/min (Figura 20).



Figura 19. Máquina universal Shimadzu ®



Figura 20. Esquema de la extracción de tornillos

6.4.6 Ensayo de flexión estática

Las pruebas de flexión estática se ajustaron a los procedimientos de la norma ASTM (D-1037) y consistió en medir la deflexión ocasionada por una carga transversal a la dirección longitudinal de 27 probetas con dimensiones de 2x2x2.5 cm, apoya en sus dos extremos (Figura 21). Las probetas fueron colocadas en dos soportes a una distancia de 20 cm. La velocidad de carga fue de 6 mm/min usando una máquina de pruebas mecánicas con capacidad de 10,000 kg.



Figura 21. Ensayo de resistencia a la flexión

Debido a que el material compuesto con partículas de *E. nitens* y PEBD no presentó módulo de ruptura, solamente se calculó el módulo de elasticidad (MOE). Para determinar el MOE se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{MOE} = \frac{(\Delta F)(L_s)^3}{(4)(a)(e^2)(\Delta d)} \quad \text{Fórmula (4)}$$

Donde:

MOE = Módulo de elasticidad (MPa)

Ls = Distancia entre soportes (cm)

a = Ancho de la probeta (cm)

e = Altura de la probeta (cm)

ΔF = cualquier diferencia de fuerza en el campo elástico (N)

Δd = deformación en el intervalo de F (cm)

6.5 Análisis estadístico

La interpretación de los datos obtenidos se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) y test de Fisher LSD a través del paquete estadístico STATGRAPHICS Centurion (v16.1) a fin de determinar si existe o no diferencia significativa entre cada combinación de concentración y tamaño de partícula. Se utilizaron 27 probetas para cada combinación de tratamiento y un nivel de confianza del 95%. Se utilizaron 3 muestras testigo (100% plástico) en cada ensayo.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Inspección visual de las muestras

El ciclo de moldeo por compresión para cada una de las corridas experimentales, fue bueno. Sin embargo, durante la compresión de las muestras para el ensayo de flexión, se tuvieron problemas en las muestras, principalmente en las periferias del compuesto final, piezas incompletas, burbujas de aire, debido a algunos problemas de prensado. Sin embargo, estos defectos se lograron eliminar mediante el dimensionado final de las probetas (Figura 22).



Figura 22. Probetas para los ensayos de flexión

En la Figura 23, se observan las probetas elaboradas para cada una de las corridas experimentales, presentan una superficie uniforme entre el relleno y la matriz plástica. También se pudo observar que el plástico solo encapsula a las partículas presentes en el interior del compuesto. Las proporciones $M_{20}P_{80}-T_{1680}$, $M_{20}P_{80}-T_{2380}$ y $M_{20}P_{80}-T_{4760}$, no presentaron modificaciones sustanciales en su color en el producto final. Las proporciones $M_{40}P_{60}-T_{1680}$, $M_{40}P_{60}-T_{2380}$ y $M_{40}P_{60}-T_{4760}$, presentaron un pequeño cambio en su coloración el cual no es significativo. Finalmente las muestras $M_{60}P_{40}-T_{1680}$, $M_{60}P_{40}-T_{2380}$ y $M_{60}P_{40}-T_{4760}$, presentaron un aumento considerable de la tonalidad y una mayor opacidad conforme al mayor porcentaje de partículas de madera. Todas las muestras presentaron una dispersión direccional de las fibras debido a que mantuvieron el patrón de trayectoria del flujo del proceso de compresión, lo que es una característica de los compuestos reforzados con fibras de madera (Poblete. 1985).



Figura 23. Probetas elaboradas para cada uno de los tratamientos

7.2 Propiedades físicas y mecánicas

7.2.1 Resultados de la densidad

El Cuadro 4, muestra los valores para la densidad de las probetas compuestas de madera y plástico y la muestra testigo (plástico al 100%). La muestra testigo presenta una densidad baja, esto de acuerdo a la tabla de clasificación para plásticos que realiza Beltrán y Marcilla (s/f). Al incorporar las partículas de madera como material de relleno, se incrementa la densidad y rigidez del material compuesto. Esto es normal, siempre que la adhesión interfacial sea buena tal y como lo mencionan Bledzki y Faruk (2006) y Stark y Rowlands (2003). Se observa que los compuestos elaborados con la malla 12, es el grupo que presenta los valores más altos de densidad, seguido de los compuestos elaborados con malla 8 y malla 4. En los tres tipos de malla, se nota que al aumentar la cantidad de partícula de madera al 60 %, incrementa la

densidad; de la misma manera, al aumentar el tamaño de partícula (malla 4) se reduce la densidad. Al comparar los valores promedio más bajo y alto (0.885 y 0.986 g/cm³) con los reportados por Klyosov (2007) (0.91 y 0.95 g/cm³), se concluye que la densidad para los tres tamaños de partícula es de media a alta. París y Gonzales (2009), reportaron densidades de 0.69 g/cm³ para un compuesto de madera mezclado con un polietileno de baja densidad, el cual clasifican como de baja densidad.

Cuadro 4. Resultados de la densidad (g/cm³)

DENSIDAD (g/cm³)										
plástico		Tamaño de partícula - Proporciones (madera-plástico)								
	Muestra testigo P100	Malla 12 (1680 µm)			Malla 8 (2380 µm)			Malla 4 (4760 µm)		
		M20-P80	M40-P60	M60-P40	M20-P80	M40-P60	M60-P40	M20-P80	M40-P60	M60-P40
Promedio	0.673	0.898	0.945	0.986	0.889	0.912	0.951	0.885	0.910	0.945
Máximo	0.690	0.914	0.953	1.006	0.904	0.924	0.967	0.890	0.928	0.952
Mínimo	0.650	0.883	0.936	0.968	0.876	0.893	0.931	0.880	0.890	0.938
Desv. Est.	0.020	0.015	0.009	0.019	0.014	0.017	0.019	0.005	0.019	0.007
C. V. %	3.021	1.706	0.906	1.951	1.575	1.856	1.958	0.555	2.093	0.753

En la tabla ANOVA (cuadro 5), se observó que las proporciones y el tamaño de partículas tienen un efecto significativo sobre la densidad. Siendo de mayor importancia el tamaño de partículas.

Cuadro 5. Análisis de varianza de la densidad

Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A:Proporciones	0.0221845	2	0.0110923	51.62	0.0000
B:Tamaño de partícula	0.00467919	2	0.00233959	10.89	0.0008
INTERACCIONES					
AB	0.000828815	4	0.000207204	0.96	0.4510
RESIDUOS	0.003868	18	0.000214889		
TOTAL (CORREGIDO)	0.0315605	26			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

En la Figura 24, se presentan las medias de la densidad a 95% Fisher LSD, se observó que la densidad fue mucho más alta al utilizar una proporción de madera al 60% con plástico al 40%. Mientras que en la Figura 25, se observa que el material compuesto presenta una mayor densidad al utilizar un tamaño de partícula más pequeño (1680 µm).

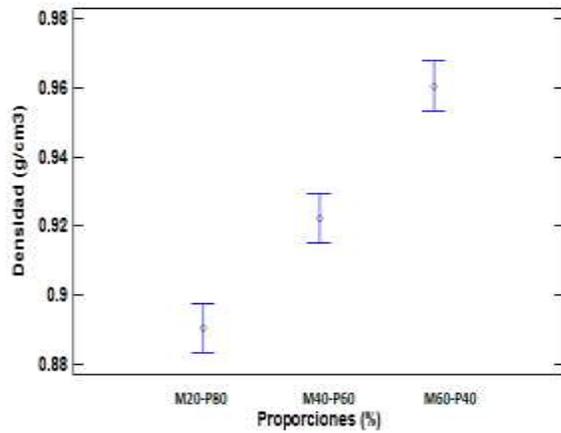


Figura 24. Densidad en función de las proporciones de la mezcla madera-plástico

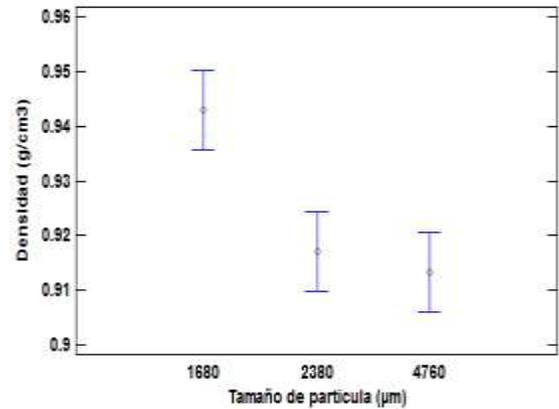


Figura 25. Densidad en función del tamaño de partícula de madera

De manera general, en la Figura 26 se muestran las interacciones entre los factores de proporciones y tamaño de partícula. Se encontró que a medida que incrementa el tamaño de partícula, disminuye la densidad del material. las tendencias mostraron que existe diferencia estadística entre cada combinación de tratamientos, la máxima densidad la presenta la proporción madera-plástico al 60-40%, con un tamaño de partícula de 1680 μm y el valor mínimo se presenta en la proporción de 20-80 % de madera y plástico, con un tamaño de partícula de 4760 μm.

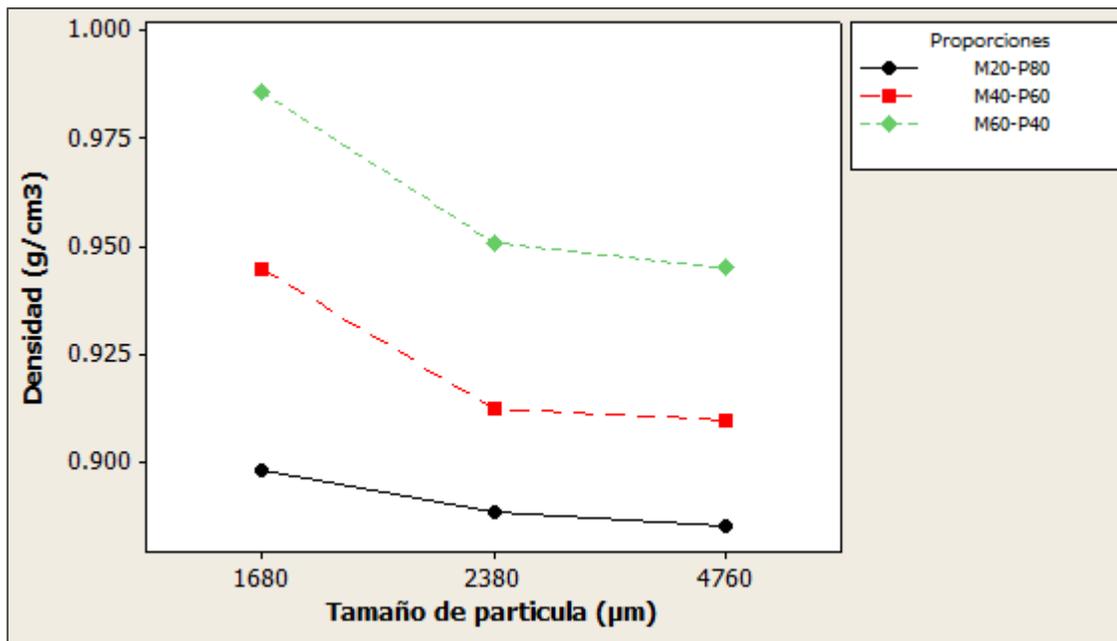


Figura 26. Interacciones entre tamaño de partícula y proporciones (madera-plástico) y su efecto en la densidad

7.2.2 Resultados del hinchamiento del espesor y absorción de agua

Hinchamiento del espesor

En el Cuadro 6, se presentan los resultados del hinchamiento del espesor de los compuestos madera-plástico. Siendo de mayor consideración para este caso el hinchamiento a las 24 y 72 horas de inmersión en agua, ya que a partir en los dos primeros tiempos, no se reflejaron valores significativos de hinchamiento. Se observó que al utilizar una mayor proporción de partículas de madera (40-60%), de malla 4, el hinchamiento de los tableros compuestos aumentó (0.829 y 1.319 %) después de 24 horas. A partir de las 72 horas, los tableros compuestos con malla 12, 8 y 4 con una proporción mayor de partícula de madera (60%), aumentaron su espesor (0.823, 1.810 y 4.943 %).

Klyosov (2007) reportó valores de hinchamiento de 0.7% a 3% en compuestos de madera con PEBD, por lo que se concluye, que las probetas elaboradas con malla 4, con mayor proporción de partículas, presentan un hinchamiento del espesor alto a partir de las 72 horas (3.143 y 4.943%), y un hinchamiento medio con la malla 12 y 8 (0.823 y 1.810%).

Cuadro 6. Resultados del hinchamiento del espesor (%)

HINCHAMIENTO DEL ESPESOR (%)											
			Tamaño de partícula - Proporciones (madera-plástico)								
Tiempo		Muestra testigo P100	Malla 12 (1680 µm)			Malla 8 (2380 µm)			Malla 4 (4760 µm)		
			M20-P80	M40-P60	M60-P40	M20-P80	M40-P60	M60-P40	M20-P80	M40-P60	M60-P40
2 h	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
12 h	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
24 h	Promedio	--	--	--	--	--	--	--	--	0.829	1.319
	Máximo	--	--	--	--	--	--	--	--	1.493	1.93
	Mínimo	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.980
	Desv. Est.	--	--	--	--	--	--	--	--	0.7	0.294
	C. V. %	--	--	--	--	--	--	--	--	92	22
72 h	Promedio	--	--	--	0.823	0.329	0.826	1.810	1.640	3.143	4.943
	Máximo	--	--	--	0.995	0.495	0.995	1.990	1.970	3.980	4.975
	Mínimo	--	--	--	0.495	--	0.493	1.478	0.990	2.463	4.902
	Desv. Est.	--	--	--	0.285	0.285	0.289	0.288	0.563	0.771	0.037
	C. V. %	--	--	--	35	87	35	16	34	25	1

(--) No presentó cambio dimensional

En el análisis estadístico del hinchamiento después de 72 horas (cuadro 7), se observó que los factores de proporciones y tamaño de partícula tiene un efecto significativo sobre el hinchamiento del espesor.

Cuadro 7. Análisis de varianza para el hinchamiento del espesor

Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A:Proporciones	16.144	2	8.07201	58.54	0.0000
B:Tamaño de partícula	43.1819	2	21.591	156.59	0.0000
INTERACCIONES					
AB	5.0178	4	1.25445	9.10	0.0003
RESIDUOS	2.48187	18	0.137882		
TOTAL (CORREGIDO)	66.8256	26			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

En la Figura 27 y 28, se presentan las tendencias del hinchamiento del espesor después de 72 horas. Se observa que a medida que incrementa el tamaño de partícula (4760 μm) y la cantidad de partícula (madera al 60%) el hinchamiento del espesor aumenta. Y al reducir la cantidad de partículas de madera (20 y 40%) y el tamaño de partícula (1680-2380 μm), el hinchamiento del espesor disminuye.

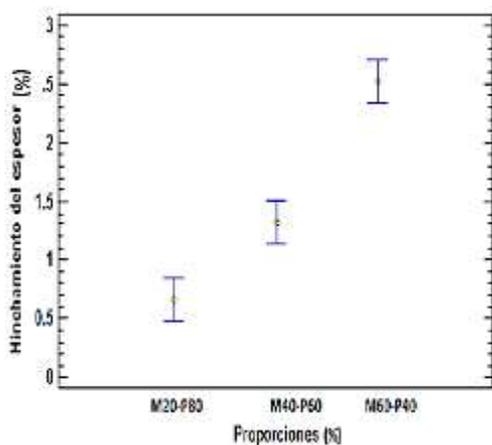


Figura 27. Hinchamiento del espesor a 72 h en función de las proporciones de la mezcla madera-plástico

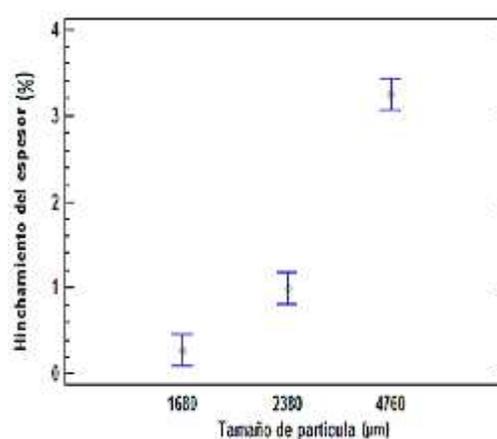


Figura 28. Hinchamiento del espesor a 72 h en función del tamaño de partícula de madera

En el gráfico de interacciones entre los factores tamaño de partícula y proporciones (Figura 29), las tendencias muestran que existe diferencia estadística entre cada combinación de tratamientos, el máximo hinchamiento del espesor lo presentan los tableros compuestos con una mayor proporción de madera (60 %) y un mayor tamaño de partícula (4760 μm).

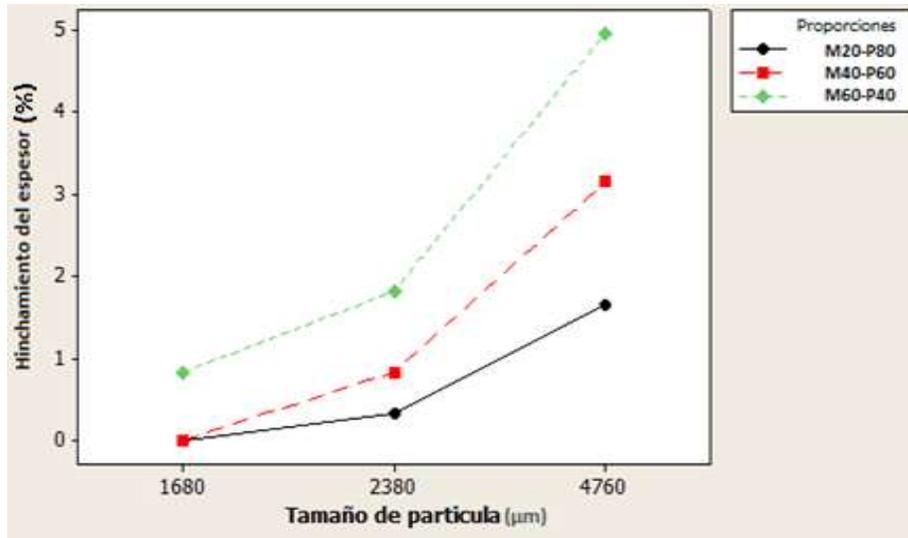


Figura 29. Interacciones entre tamaño de partícula y proporciones (madera-plástico) y su efecto en el hinchamiento del espesor a 72 h

Absorción de agua

Los resultados de absorción de agua, de acuerdo al tamaño de partícula y proporción de los materiales (madera-plástico), se presentan en el Cuadro 8. Siendo de mayor consideración el hinchamiento después de 72 horas de inmersión en agua, debido a que en los primeros periodos de inmersión no se reflejaron valores significativos o cambio alguno de absorción de agua en los compuestos. Se observó que las probetas con partículas más grandes (malla 4 y 8), absorbieron mayor cantidad de agua que los de partículas pequeñas, tanto a 2, 12, 24 y 72 horas. Esto es debido a que los tableros con partículas grandes, presentaron mayor número de pequeñas cavidades en su interior, donde se puede depositar el agua. De acuerdo al estudio realizado por Klyosov (2007), los rangos de valores obtenidos en este estudio a 72 horas de 0.16 y 2.52%, son satisfactorios, ya que este autor indica que los materiales de WPC absorben cantidades variables de humedad, cuando se sumergen en el agua, absorben típicamente entre 0.7 y 3% en peso después de 24 h de la inmersión. En cuanto al tablero testigo (plástico a 100%), presenta una absorción de agua nula.

Cuadro 8. Resultados de la absorción de agua (%)

ABSORCIÓN DE AGUA (%)											
			Tamaño de partícula - Proporciones (madera-plástico)								
Tiempo		Muestra testigo P100	Malla 12 (1680 µm)			Malla 8 (2380 µm)			Malla 4 (4760 µm)		
			M20-P80	M40-P60	M60-P40	M20-P80	M40-P60	M60-P40	M20-P80	M40-P60	M60-P40
2 h	Promedio	--	0.073	0.086	0.107	0.028	0.028	0.028	0.101	0.076	0.119
	Máximo	--	0.111	0.106	0.129	0.042	0.042	0.041	0.108	0.104	0.126
	Mínimo	--	0.044	0.064	0.085	0.021	0.021	0.021	0.087	0.062	0.105
	Desv. Est.	--	0.034	0.021	0.022	0.012	0.012	0.012	0.012	0.024	0.012
	C. V. %	--	46.872	24.336	20.690	42.103	43.356	41.742	12.027	31.733	10.377
12 h	Promedio	--	0.139	0.157	0.206	0.057	0.078	0.076	0.180	0.180	0.217
	Máximo	--	0.200	0.174	0.258	0.084	0.106	0.084	0.216	0.229	0.231
	Mínimo	--	0.087	0.128	0.169	0.043	0.042	0.061	0.152	0.145	0.209
	Desv. Est.	--	0.057	0.025	0.046	0.024	0.032	0.013	0.033	0.044	0.012
	C. V. %	--	40.736	15.975	22.166	42.103	41.838	16.977	18.309	24.234	5.646
24 h	Promedio	--	0.191	0.235	0.349	0.106	0.120	0.118	0.353	0.485	0.594
	Máximo	--	0.267	0.256	0.558	0.126	0.148	0.126	0.391	0.646	0.858
	Mínimo	--	0.131	0.217	0.233	0.086	0.084	0.102	0.323	0.394	0.399
	Desv. Est.	--	0.069	0.020	0.181	0.020	0.032	0.014	0.035	0.140	0.237
	C. V. %	--	36.301	8.376	51.905	18.991	27.101	11.478	9.825	28.779	39.933
72 h	Promedio	--	0.286	0.364	1.088	0.163	0.190	2.314	1.161	1.614	2.516
	Máximo	--	0.311	0.381	1.184	0.189	0.212	2.412	1.303	1.682	2.856
	Mínimo	--	0.262	0.342	1.030	0.129	0.169	2.209	1.032	1.555	2.343
	Desv. Est.	--	0.025	0.020	0.084	0.031	0.022	0.102	0.136	0.064	0.294
	C. V. %	--	8.598	5.460	7.709	19.058	11.338	4.413	11.713	3.977	11.701

(--) No presenta absorción de agua

En el análisis estadístico de la absorción de agua después de 72 horas (cuadro 9), se observó que los factores de proporciones y tamaño de partícula, tienen un efecto significativo sobre la absorción de agua a las 72 h.

Cuadro 9. Análisis de varianza para la absorción de agua

Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A:Proporciones	10.9797	2	5.48987	382.66	0.0000
B:Tamaño de partícula	6.78924	2	3.39462	236.61	0.0000
INTERACCIONES					
AB	2.19	4	0.547499	38.16	0.0000
RESIDUOS	0.25824	18	0.0143467		
TOTAL (CORREGIDO)	20.2172	26			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

En la Figura 30 y 31, se presentan las tendencias de la absorción de agua después de 72 horas. Se observó que a medida que incrementa el tamaño de partículas (4760 μm) y la cantidad de partículas (madera al 60%) la absorción de agua aumenta. Y al reducir la cantidad de partículas de madera (20 y 40%) y el tamaño de partículas (1680-2380 μm), la absorción de agua disminuye.

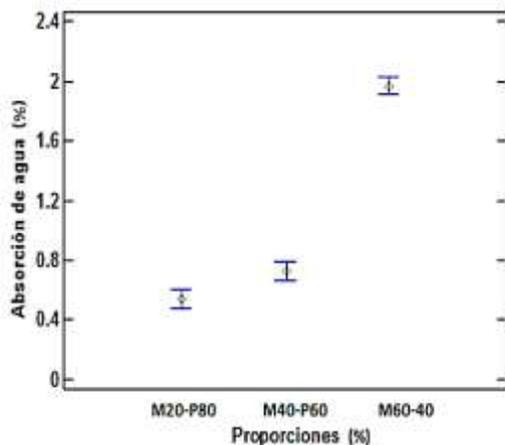


Figura 30. Absorción de agua a 72 horas en función de las proporciones de la mezcla madera-plástico

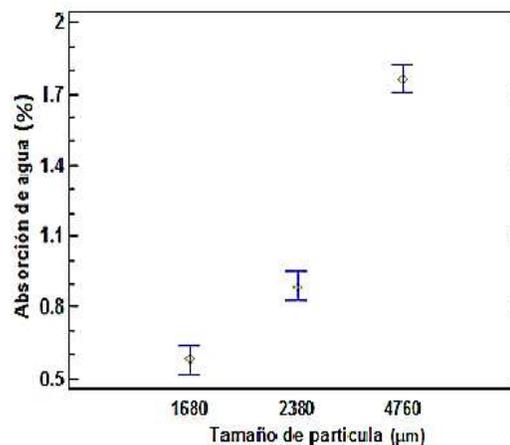


Figura 31. Absorción de agua a 72 horas en función del tamaño de partícula de madera

En el gráfico de interacciones entre los factores tamaño de partícula y proporciones (Figura 32), las tendencias muestran una diferencia estadística entre cada combinación de tratamientos, la máxima absorción de agua lo presentan los tableros compuestos con una mayor proporción de madera al 60% con un tamaño de partícula de 4760 μm .

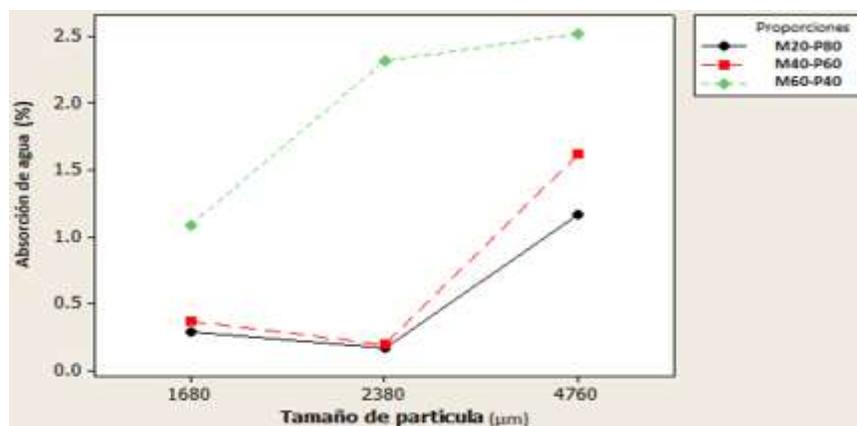


Figura 32. Interacciones entre tamaño de partícula y proporciones (madera-plástico) y su efecto en la absorción de agua a 72 h

7.2.3 Resultados para la dureza Shore D (HD)

En el Cuadro 10, se observa que el material compuesto de partículas de *Eucalyptus nitens* con polietileno de baja densidad presentó un rango de dureza Shore D de 52 a 86 HD para las tres proporciones utilizadas. Las probetas que presentaron una mayor dureza Shore D, son los de malla 4 (68, 81 y 86 HD), se nota que a mayor proporción de partículas de madera (60%) incrementa la dureza para los tres tamaños de malla. Por otro parte, la muestra testigo presentó una dureza Shore D (59 HD) similar a las proporciones elaboradas con un tamaño de partícula de 1680 µm y 2380 µm.

Al comparar los valores promedio con el estudio realizado por Raya (2014), que reportó un valor mínimo de 63 HD y un máximo de 76 HD, para un material compuesto de madera y PEBD (Anexo III), se concluye que las probetas de malla 4 con una mayor proporción de partícula de madera (40 y 60%), presentan una alta dureza (81 y 86 HD).

Cuadro 10. Resultados de la dureza Shore D (HD)

DUREZA SHORE D (HD)										
Plástico		Tamaño de partícula - Proporciones (madera-plástico)								
	Muestra testigo P100	Malla 12 (1680 µm)			Malla 8 (2380 µm)			Malla 4 (4760 µm)		
		M20-P80	M40-P60	M60-P40	M20-P80	M40-P60	M60-P40	M20-P80	M40-P60	M60-P40
Promedio	59	56	62	74	52	58	67	68	81	86
Máximo	62	58	67	79	55	61	69	70	83	90
Mínimo	56	53	58	70	48	55	66	67	79	79
Desv. Est.	3	3	5	5	4	3	2	2	2	6
C. V. %	5	5	7	6	7	5	2	2	3	7

En el análisis estadístico (cuadro 11), se observó que tanto el factor de proporciones como el tamaño de partícula tienen un efecto significativo sobre la dureza Shore D.

Cuadro 11. Análisis de varianza de la dureza Shore D (HD)

Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A:Proporciones	1300.96	2	650.481	49.89	0.0000
B:Tamaño de partícula	1762.07	2	881.037	67.58	0.0000
INTERACCIONES					
AB	51.9259	4	12.9815	1.00	0.4353
RESIDUOS	234.667	18	13.037		
TOTAL (CORREGIDO)	3349.63	26			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

En la Figura 33 y 34, se muestran las tendencias de la dureza Shore D (HD). Se observó que la proporción con madera de 60% con plástico de 40% presenta una mayor dureza Shore D y la que menos dureza presentó es la que contiene 20% de madera y 80% plástico. Por otra parte, se observa que la dureza Shore D (HD) aumenta al incorporar un tamaño de partícula más grande (4760 μm), mientras que a utilizar un tamaño de partícula de 2380 μm se reduce la dureza del material compuesto.

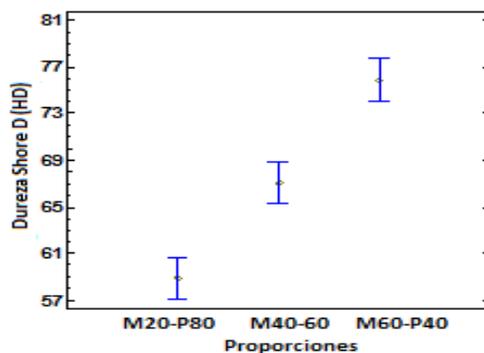


Figura 33. Dureza Shore D en función de las proporciones de a mezcla madera-plástico

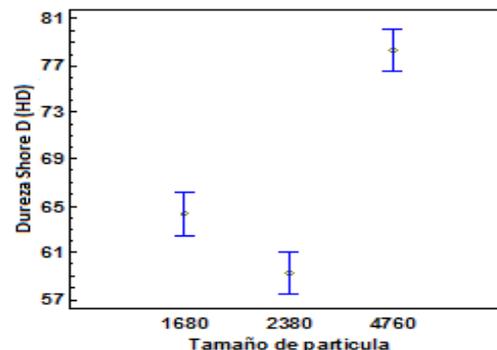


Figura 34. Dureza Shore D en función del tamaño de partícula de madera

La Figura 35, muestra las interacciones entre los factores tamaño de partícula y proporciones (madera-plástico). Se encontró que al incrementar el tamaño de partícula, aumenta la dureza Shore D del material compuesto. Las tendencias muestran que existe diferencia estadística entre cada combinación de tratamientos, la máxima dureza Shore D la presenta la proporción madera-plástico a 60-40%, con un tamaño de partícula de 4760 μm y el valor mínimo se presenta en la proporción de 20-80 % de madera y plástico, con un tamaño de partícula de 2380 μm .

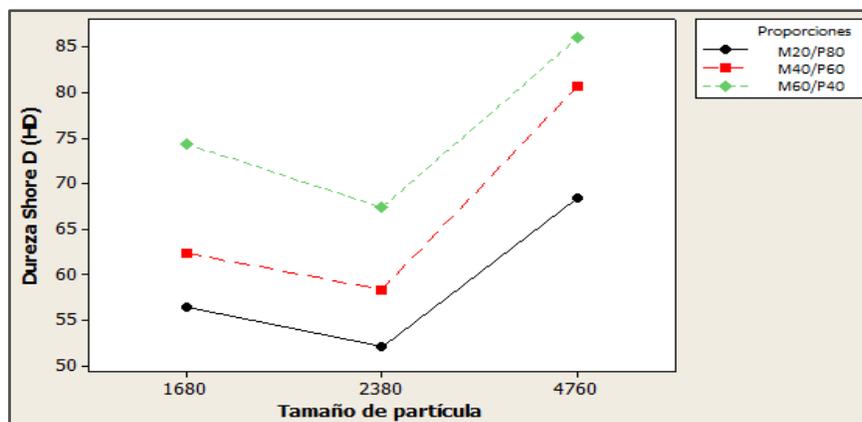


Figura 35. Interacciones entre tamaño de partícula y proporciones (madera-plástico) y su efecto en la dureza Shore D (HD)

7.2.4 Resultados para la dureza Janka

En el Cuadro 12, se muestran los valores promedios para a dureza Janka, los cuales fluctúan en un intervalo de 467 a 695 kg/cm². Se observó que al utilizar una mayor proporción de partículas de madera de eucalipto (60%), la dureza aumenta (695, 671 y 623 kg/cm²), clasificándose como alta. Mientras que al disminuir la proporción de partícula (20%), la dureza disminuye (467, 490 y 507 kg/cm²), clasificándose como baja. Por otro parte, la muestra testigo presento una dureza Janka (459 kg/cm²) menor a las proporciones elaboradas con los diferentes tamaños de partículas (1680 μm, 2380 μm y 4760 μm).

Cuadro 12. Resultados de la dureza Janka (kg/cm²)

DUREZA JANKA (kg/cm ²)										
Plástico		Tamaño de partícula - Proporciones (madera-plástico)								
	Muestra testigo P100	Malla 12 (1680 μm)			Malla 8 (2380 μm)			Malla 4 (4760 μm)		
		M20-P80	M40-P60	M60-P40	M20-P80	M40-P60	M60-P40	M20-P80	M40-P60	M60-P40
Promedio	459	467	612	695	490	563	671	507	599	623
Máximo	80	480	618	710	500	568	674	538	612	632
Mínimo	40	450	608	682	480	558	668	488	586	618
Desv. Est.	20	16	5	14	10	5	3	27	13	8
C. V. %	4	3	1	2	2	1	0	5	2	1

En el análisis estadístico (cuadro 13), se observó que los factores de proporciones y el tamaño de partícula tienen un efecto significativo sobre la dureza Janka. Siendo de mayor importancia el tamaño de partículas.

Cuadro 13. Análisis de varianza para la dureza Janka

Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A:Proporciones	139152.	2	69576.1	404.16	0.0000
B:Tamaño de partícula	1532.74	2	766.37	4.45	0.0269
INTERACCIONES					
AB	12739.3	4	3184.81	18.50	0.0000
RESIDUOS	3098.67	18	172.148		
TOTAL (CORREGIDO)	156523.	26			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

En la Figura 36 y 37, se muestran las tendencias de la dureza Janka. Se observó que la proporción que presenta mayor dureza, es la que contiene partículas de madera al 60% y plástico al 40%, la que menor dureza presenta es la que contiene madera al 20%. Por otra parte, se observó que la dureza Janka aumenta al utilizar un tamaño de partícula pequeña (1680 μm), mientras que, a utilizar un tamaño de partícula más grande (2380-4760 μm) se reduce considerablemente la dureza Janka del material compuesto.

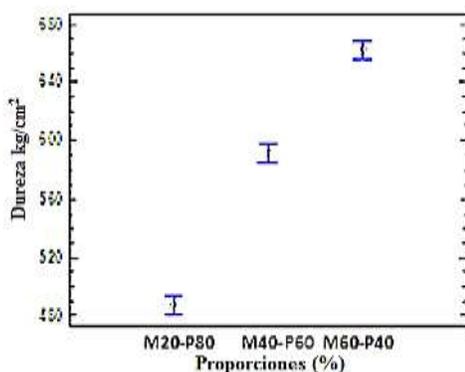


Figura 36. Dureza Janka en función de las proporciones de la mezcla madera-plástico

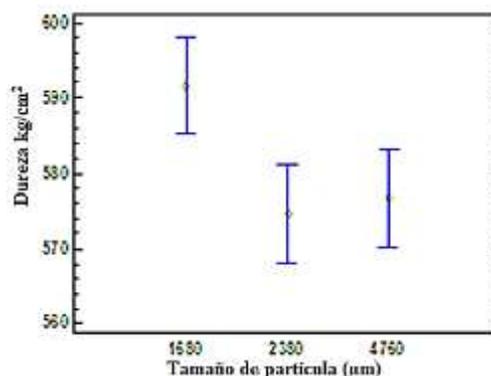


Figura 37. Dureza Janka en función del tamaño de partícula de madera

En la Figura 38, se muestran las interacciones entre los factores tamaño de partícula y proporciones. Las tendencias muestran que existe diferencia estadística entre cada combinación de tratamientos, la máxima dureza Janka la presenta la proporción de madera-plástico al 60-40%, con un tamaño de partícula de 1680 μm , mientras que, los valores mínimos se presentan al utilizar una proporción de 20-80 % de madera y plástico.

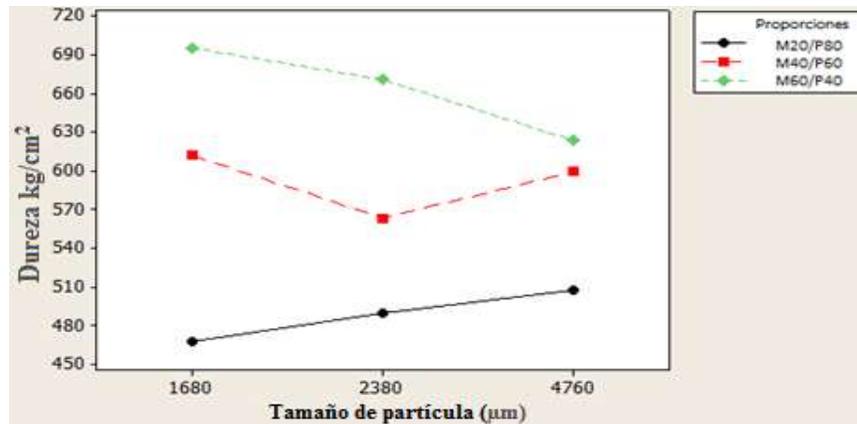


Figura 38. Interacciones entre tamaño de partícula y proporciones (madera-plástico) y su efecto en la dureza Janka

7.2.5 Resultados en la resistencia a la extracción de tornillos

En el Cuadro 14, se muestran los valores promedios para la resistencia a la extracción de tornillos, las probetas compuestas con partículas pequeñas de madera (malla 12 y 8) presentaron valores bajos. Se observó que al utilizar una mayor proporción de partículas de madera (60%), la resistencia a la extracción de tornillos aumenta. Mientras que al disminuir la proporción (20%) de partícula la resistencia disminuye. Por otro parte, la muestra testigo presenta diferencia estadísticamente significativas con los demás tableros madera/plástico, conformando una resistencia a la extracción de tornillos baja. Raya (2015), reportó valores de resistencia a la extracción de tornillos para tableros compuestos de madera, los cuales son muy bajos de 50 a 85 kg (Anexo IV).

Cuadro 14. Resultados de la resistencia a la extracción de tornillos (kg)

RESISTENCIA A LA EXTRACCIÓN DE TORNILLOS (kg)										
Plástico		Tamaño de partícula - Proporciones (madera-plástico)								
Muestra testigo P100		Malla 12 (1680 µm)			Malla 8 (2380 µm)			Malla 4 (4760 µm)		
		M20-P80	M40-P60	M60-P40	M20-P80	M40-P60	M60-P40	M20-P80	M40-P60	M60-P40
Promedio	307	314	319	326	314	320	326	320	325	335
Máximo	310	316	322	328	318	323	328	322	328	337
Mínimo	302	312	316	324	310	318	324	318	322	332
Desv. Est.	4	2	3	2	4	3	2	2	3	3
C. V. %	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

En el análisis estadístico (cuadro 15), se muestra que los factores de proporciones y tamaño de partícula tienen un efecto significativo sobre la resistencia a la extracción de tornillos.

Cuadro 15. Análisis de varianza para la resistencia a la extracción de tornillos

Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A:Proporciones	729.407	2	364.704	51.55	0.0000
B:Tamaño de partícula	273.852	2	136.926	19.36	0.0000
INTERACCIONES					
AB	15.2593	4	3.81481	0.54	0.7088
RESIDUOS	127.333	18	7.07407		
TOTAL (CORREGIDO)	1145.85	26			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

En la Figura 39 y 40, se muestran las tendencias de la resistencia a la extracción de tornillos. Se observó que a medida que incrementa el tamaño de partículas (4760 μm) y la cantidad de partículas (madera al 60%) se tiene una mayor resistencia a la extracción de tornillos. Por otra parte, al reducir a cantidad de partículas de madera (20 y 40%) y el tamaño de partículas (1680-2380 μm), la resistencia a la extracción de tornillos disminuye considerablemente.

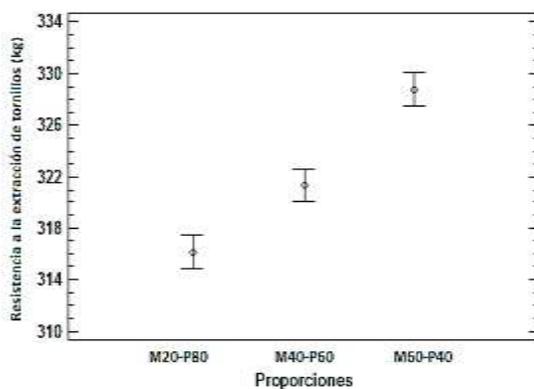


Figura 39. Extracción de tonillos en función de las proporciones de la mezcla madera-plástico

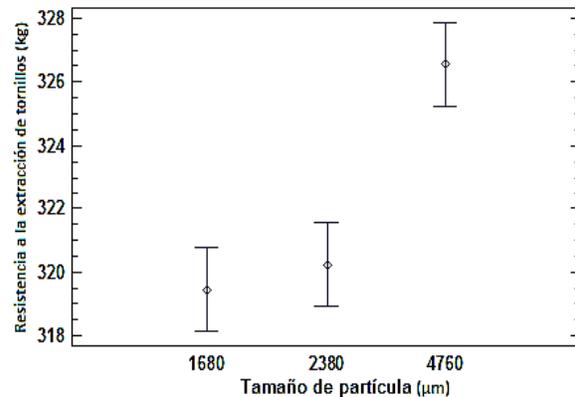


Figura 40. Extracción de tonillos en función del tamaño de partícula de madera

La Figura 41, muestra las interacciones entre los factores de tamaño de partícula y proporciones. Las tendencias muestran que existe diferencia estadística entre cada combinación de tratamientos, la máxima resistencia a la extracción de tornillos la presentaron los tableros compuestos con una mayor proporción de madera (60 %) y un mayor tamaño de partículas (4760 μm).

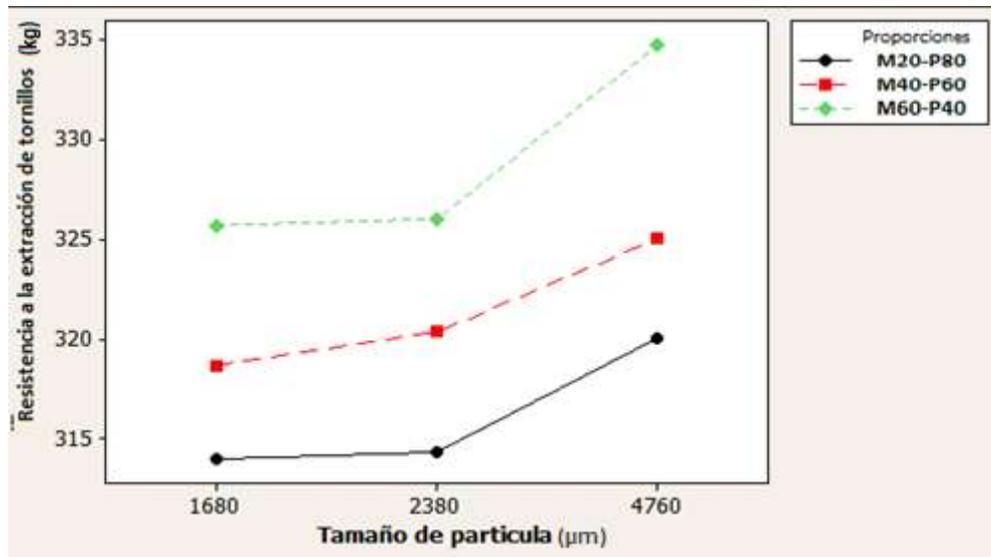


Figura 41. Interacciones entre tamaño de partícula y proporciones (madera-plástico) y su efecto en la resistencia a la extracción de tornillos

7.2.6 Resultados en la flexión estática (MOE)

El Cuadro 16, muestra los valores de módulo de elasticidad (MOE) de las probetas compuestas de madera y plástico y la muestra testigo (plástico al 100%). La muestra testigo presentaron un MOE alto. Se observó que los compuestos elaborados con la malla 12, en sus tres diferentes proporciones de madera (20, 40 y 60%), es el grupo que presenta los valores más altos de MOE, seguido de los compuestos elaborados con malla 8. Las probetas de malla 4, tienen los valores más bajos de MOE. En los tres tipos de malla, se observó que al aumentar la cantidad de partículas de madera al 60 %, a cada probeta, disminuye el MOE, obteniendo compuestos menos rígidos, de la misma manera, al aumentar el tamaño de partícula (malla 4) se reduce el MOE, y al disminuir el tamaño de partícula (malla 12) se incrementa.

Paris y González (2009), reportaron valores del MOE de 422.3 MPa en sección longitudinal y 359.21 MPa en sección transversal, en WPC elaborados con polietileno de baja densidad. Rubyet (2010) al evaluar diferentes formulaciones de madera-plástico, encontró valores del MOE de 16.5 MPa. Por otro lado, Moya *et al.*, (2012) determinaron las propiedades físicas y mecánicas de compuestos de polietileno con harinas de madera de pino mediante un proceso de moldeo por inyección, obteniendo un MOE de 55.46 MPa. Solis y Lisperguer (2002) al realizar un estudio de compuestos mixtos a base de plásticos y madera, utilizando dos especies maderables (pino y raulí) en una proporción de madera (%) y plástico (10:90 y 20:80)

encontraron un MOE de 7788- 6233 kg/cm² (611-763 MPa). Los valores reportados por este último autor, son similares a los encontrados en los tres diferentes tipos de malla utilizados en esta investigación

Cuadro 16. Resultados del módulo de elasticidad en flexión

MÓDULO DE ELASTICIDAD (MPa)										
plástico		Tamaño de partícula - Proporciones (madera-plástico)								
	Muestra testigo P100	Malla 12 (1680 µm)			Malla 8 (2380 µm)			Malla 4 (4760 µm)		
		M20-P80	M40-P60	M60-P40	M20-P80	M40-P60	M60-P40	M20-P80	M40-P60	M60-P40
Promedio	626	606	597	589	544	501	478	437	397	323
Máximo	644	614	601	591	552	506	483	448	404	345
Mínimo	614	601	591	588	532	493	475	428	391	307
Desv. Est.	16	7	6	2	11	7	5	10	7	20
C. V. %	3	1	1	0	2	1	1	2	2	6

En la tabla ANOVA (cuadro 17), se observó que los factores de proporciones y tamaño de partícula tienen un efecto significativo sobre el módulo de elasticidad.

Cuadro 17. Análisis de varianza del módulo de elasticidad

Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A: Proporciones (%)	19404.3	2	9702.13	106.16	0.0000
B: Tamaño de partícula (µm)	203951.	2	101975.	1115.77	0.0000
INTERACCIONES					
AB	7777.32	4	1944.33	21.27	0.0000
RESIDUOS	1645.1	18	91.3945		
TOTAL (CORREGIDO)	232778.	26			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

En la Figura 42, se muestran las tendencias del MOE. Se observó que el módulo de elasticidad fue mucho más alto al utilizar una proporción de madera al 20% y plástico al 80%. Mientras que en la Figura 43, se observó que el material compuesto presenta un mayor módulo de elasticidad al utilizar un tamaño de partícula pequeña de 1680 µm, se notó que al aumentar el tamaño de partículas el MOE disminuye.

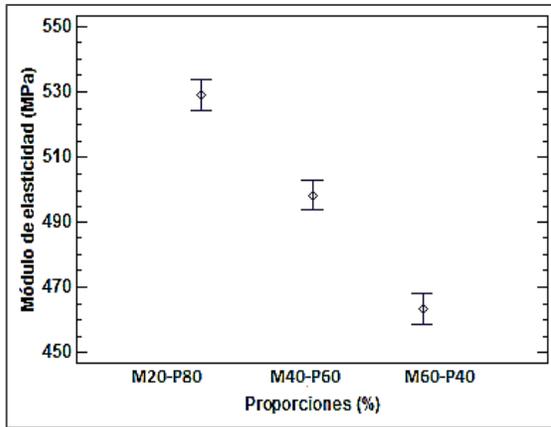


Figura 42. Módulo de elasticidad en función de las proporciones madera-plástico

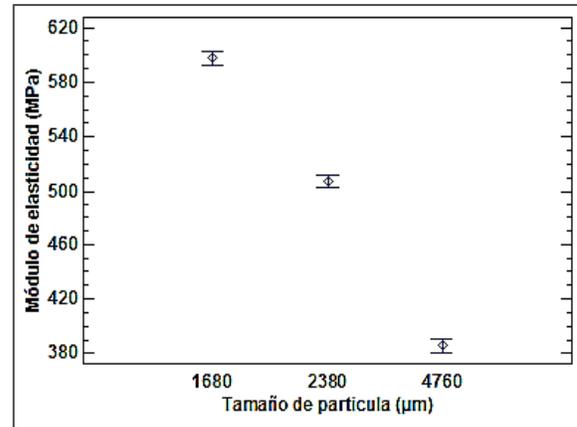


Figura 43. Módulo de elasticidad en función del tamaño de partícula de madera

La Figura 44, muestra las interacciones entre los factores de proporciones y tamaño de partícula. Se encontró que a medida que incrementa el tamaño de partícula, disminuye el módulo de elasticidad del material compuesto. Las tendencias muestran que existe diferencia estadística entre cada combinación de tratamientos, el máximo módulo de elasticidad, se presenta en la proporción madera-plástico al 20-80%, con un tamaño de partícula de 1680 µm y el valor mínimo se presenta en la proporción de 60-40 % de madera y plástico, con un tamaño de partícula de 4760 µm.

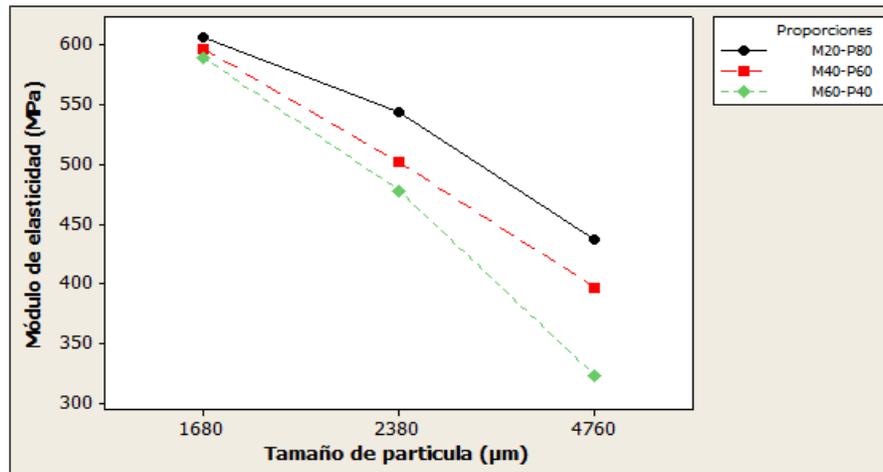


Figura 44. Interacciones entre tamaño de partícula y proporciones (madera-plástico) y su efecto en el módulo de elasticidad

Cuadro 18. Resumen de las propiedades físicas y mecánicas del material compuesto con partículas de *Eucalyptus nitens* y PEBD

PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS											
			Tamaño de partícula - Proporciones (madera-plástico)								
	Unidades	Muestra testigo P100	Malla 12 (1680 µm)			Malla 8 (2380 µm)			Malla 4 (4760 µm)		
			M20-P80	M40-P60	M60-P40	M20-P80	M40-P60	M60-P40	M20-P80	M40-P60	M60-P40
Densidad	g/cm ³	0.673	0.898	0.945	0.986	0.889	0.912	0.951	0.885	0.910	0.945
Hinch. del espesor:											
a 24 h	%	--	--	--	--	--	--	--	--	0.829	1.319
a 72 h	%	--	--	--	0.823	0.329	0.826	1.810	1.640	3.143	4.943
Absor. de agua:											
a 2 h	%	--	0.073	0.086	0.107	0.028	0.028	0.028	0.101	0.076	0.119
a 12 h	%	--	0.139	0.157	0.206	0.057	0.078	0.076	0.180	0.180	0.217
a 24 h	%	--	0.191	0.235	0.349	0.106	0.120	0.118	0.353	0.485	0.594
a 72 h	%	--	0.286	0.364	1.088	0.163	0.190	2.314	1.161	1.614	2.516
Dureza Shore D	HD	59	56	62	74	52	58	67	68	81	86
Dureza Janka	kg/cm ²	459	467	612	695	490	563	671	507	599	623
R. a la extracción de tornillos	kg	307	314	319	326	314	320	326	320	325	335
MOE en flexión	Mpa	626	606	597	589	544	501	478	437	397	323

(--) No presentó cambio dimensional

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Procesamiento de las muestras

Se observó que los compuestos presentan un cambio de coloración por efecto de la temperatura.

Densidad

Al aumentar la proporción y disminuir el tamaño de las partículas de madera, la densidad aumenta.

Hinchamiento del espesor

A medida que incrementa el tamaño y la cantidad de partícula de madera, el hinchamiento del espesor aumenta.

Absorción de agua

Al incrementar el tamaño y la cantidad de partículas madera, la absorción de agua aumenta.

Dureza Shore D (HD)

Al aumentar la proporción y tamaño de partícula de madera, aumenta la dureza Shore.

Dureza Janka

Al aumentar la proporción y disminuir el tamaño de las partículas de madera, la dureza Janka aumenta.

Extracción de tornillos

Al incrementar el tamaño y la cantidad de partículas de madera, se tiene una mayor resistencia a la extracción de tornillos.

Módulo de elasticidad

Al aumentar la proporción y el tamaño de las partículas de madera, el MOE disminuye

Recomendaciones

Se recomienda que el material compuesto con mayor cantidad y mayor tamaño de partículas de *E. nitens*, sean utilizados en pisos, cubiertas de muebles, revestimientos de paredes. Para su uso

en intemperie, se recomienda incorporar algún tipo de aditivo para generar un mejor comportamiento contra la humedad y el ataque de hongos de la pudrición. El material compuesto con menor cantidad y menor tamaño de partículas de *E. nitens*, puede ser utilizado sin aditivos en aquellos lugares expuestos al intemperie debido a su alta estabilidad dimensional, ya sea para pisos y revestimientos de superficies con alta humedad.

Realizar pruebas de maquinado, para recomendar el mejor procesamiento mecánico del material.

Se recomienda incorporar algún tipo de aditivo durante la aplicación del calor al molde, para evitar que la mezcla de madera-plástico se quede pegada sobre el molde. También se recomienda incorporar algún agente acoplante para tener una mezcla más homogénea de materiales y evitar algunos defectos de proceso (burbujas de aire, piezas incompletas, grietas etc.).

Para evitar la decoloración de la superficie del material compuesto, se recomienda disminuir la temperatura de 120°C y aumentar el tiempo de moldeo.

9. BIBLIOGRAFIA

- Alcántara, V. (2015). Mercado mexicano de WPC empieza a crecer. [Internet]. Disponible en: <<http://www.plastico.com/temas/Mercado-mexicano-de-WPC-empieza-a-crecer+107462>>. [Consulta: Abril, 2016].
- ASTM (American Society for Testing and Materials). Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials. D 10377. Annual book of ASTM standards. Section 4: Construction. Volume 04.09: American Society for Testing and Materials. Philadelphia, Pennsylvania.
- Barone, J.; Schmidt, W.; Liebner, C. (2005). Compounding and molding of polyethylene composites reinforced with keratin feather fiber, *Composites Science and Technology* 65:683-692.
- Beltrán, M.; Marcilla, A. (s/f). Estructura y propiedades de los polímeros. *Tecnología de polímeros*. pp. 61-273.
- 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 Manufacturing*, 36(6):789-797.
- Bledzki, A. K. (2005). A comparison of compounding processes and wood type for woodfibre-PP composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 789-797.
- Bland, D. (1985). The composition and Analysis of eucalyptus wood. *Appita*, 38(4):291-294.
- Borgoño, A. E. (2006). Comportamiento pulpable de *Eucalyptus nitens* normal y suprimido crecido en la X región de Chile. Tesis profesional. Universidad austral de Chile. Facultad de ciencias forestales.

- Botero, E.; Romo, M.; Méndez, B.; González, C. (2013). Desarrollo de un material compuesto ultraligero para construir la plataforma de una mesa vibradora. *Ingeniería Investigación y Tecnología XIV*, 04:595-611.
- Bouafif, H.; Koubaa, A.; Perré, P.; Cloutier, A. (2009). Effects of fiber characteristics on the physical and mechanical properties of wood plastic composites. Publish in Revisit Science Direct. *Composites: Part A (40)*:1975-1981.
- Browning, B. (1967). *Methods of wood chemistry*, Intersci, Public. N.Y., London, Vol. 2. pp. 800.
- Casimiro, J. C. (2015). Efecto de la Inmersión en Agua Caliente en las Propiedades Físico Mecánicas de *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) de 8 Años de Edad Procedente de Plantación Forestal Comercial. Tesis profesional. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la madera. Maestría en Ciencias y tecnología de la Madera.
- Cervantes, L.; Ortega, A.; Garza, R. (2006). *Compósitos de Madera Plástica*. México. [Internet]. Disponible en: <http://rolandog.com/wp-content/uploads/2006/12/reporte.pdf>. [Consulta: febrero, 2016].
- Clemons, C. (2002). Wood-plastics composites in the United States. *Forest Products Journal* 52(6):10-18.
- Cornish, M. L. (1997). *El ABC de los plásticos*. [Internet]. México: Universidad Iberoamericana, Disponible en: http://books.google.co.ve/books?id=QW8UyW9YO9QC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false. [Consulta: febrero, 2016].
- 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.
- English, B.; Stark, N.; Clemons, C. (1997). Weight Reduction: Wood versus Mineral Fillers in Polypropylene. Fourth International Conference on Wood fibre-Plastic Composites. May 12-14, Madison, Wisconsin, USA.

- Enderle, H. F. (2008). Polyethylene: High-density. Encyclopedia of Materials: Science and Technology. pp: 7172-7180.
- Espert, A. (2004). Comparison of water absorption in natural cellulosic fibres from wood and one-year crops in polypropylene composites and its influence on their mechanical properties. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 1267-1276.
- 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.
- Facca, A.; Kortschot, M.; Yan, N. (2006), Composites, Part A., Applied Science and Manufacturing. Science Direct. Vol. 37:819-970.
- FAO. 1981. El eucalipto en la repoblación forestal. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación. Roma. Italia.
- Fengel, D.; Wegener, G. (1984). Wood Chemistry, Ultrastructure Reaction, Walter de Gruyter, Berlín. pp. 2-220.
- Flores, P. f.; Yamaji, M.; Vendrasco, L.; Pires, C. (2009). Ensaio de arrancamento de pregos em madeira sólida. Congresso de Iniciação Científica, 17, São Carlos. Anais de Eventos da UFSCar. 5:611.
- Garibay, G. A.; Casimiro, J.C.; Hernández, J. (2013). Análisis anatómico de la madera de *Eucalyptus nitens*. Reporte de laboratorio de anatomía de la madera. Facultad de ingeniería en Tecnología de la madera. Maestría en Ciencias y tecnología de la Madera. pp. 3-4.
- Garibay, G. A. (2015). Efecto del tratamiento en las propiedades físico-mecánicas de *eucalyptus nitens* (deane & maiden) procedentes de una plantación comercial. Tesis profesional. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la madera. Maestría en Ciencias y tecnología de la Madera.
- Gardner, D. J. y Murdock, D. (2010). Extrusion of wood plastic composites. University of Maine, Orono ME. USA.
- Gorrini, B.; Poblete, H.; Hernández, G.; Dunn, F. (2004). Tableros de partículas y MDF de *Eucalyptus nitens*: Ensayos a escala industrial. Bosque 25(3):89-97.

- Heebink, G.; Hann, A. (1959). How wax and particle shape affect stability and strength of oak particle boards. *Forest Product Journal* 9(7):197-203.
- Infor (Instituto Forestal) (2005). Estadísticas [Internet]. Disponible en: http://www.infor.cl/webinfor/estadisticas_Forestales/estadisticas.htm. [consulta: mayo, 2015].
- Jayaraman, K.; Bhattacharyya, D. (2004). Mechanical performance of wood fiber-waste plastic composite materials. *Resources Construction and Recycling*, 41(4):307-319.
- Kibblewhite, P.; Johnson, I.; Shelbourne, J. A. (2000a). Kraft pulp qualities of *Eucalyptus nitens*, *E. Globulus*, and *E. Maidenii*, at ages 8 and 11 years. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 30(3):447-457.
- Kibblewhite, P.; Riddell J. C.; Shelbourne, J. A. (2000b). Variations in wood, Kraft fibre, and handsheet properties among 29 trees of *Eucalyptus regnans*, and comparison with *E. Nitens* and *E. Fastigata*. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 30(3):458-474.
- Klyosov, A. (2007). *Wood-Plastic Composite*. John Wiley-Interscience Inc. Hoboken, New Jersey. USA.
- Kusian, R. (1968). Model investigations on the influence of particle size on structure and strength properties of particle materials. 1. Theoretical considerations. *Holztechnologie* 9(4):241-248.
- 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.
- Lincoln, W. (2006). *World Wood in Color*. Linden publishing co. Inc. Fresno, California, 320 p.
- 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.
- Mano, E.; Bonelli, C.; Guadagnini, M.; Sand L. (1994). Plastic Wood From Urban Waste Recycled Plastics as a Substitute for Lumber. *Technical Scientific. Polymers: Science y Technologic*. pp. 19-24.

- Mariano, O. (2011). Tecnología de los plásticos. [Internet]. Disponible en: < http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.mx/p/reciclado-de-materiales-plasticos_17.html>. [consulta: mayo 12, 2014].
- Mankowski, M.; Morrell, J.J. (2000). Patterns of fungal attack in wood-plastic composites following exposure in a soil block test. *Wood and Fiber Science* 32(3):340-345.
- McHenry, E. (2003). Composite materials based on wood and nylon fibre. *Composites: Part A.*, 171-181.
- Mclaren y Donald (1995). Carrocería de plástico de fibra de vidrio. *Industria pesada checoslovaca*, Vol. 4. p. 621.
- Mihaela, D.; Nicoleta, A.; Ghiurea, M.; Ilie, C.; Radovici, C.; Doina, M. – “Properties of Polymer Composites with Cellulose Microfibrils”, en: *Advances in Composites Materials- Ecodesign and Analysis*, cap.5, Attaf, B (ed.), Intech Open Acces Publisher, Rijeka Croatia (2011).
- Moreno, P.; Rodrigue, D.; Giroux, Y.; Ballerini, A.; Gacitúan, W. (2011). Espumado de termoplásticos reciclados reforzados con sub productos de madera. V Congreso Forestal Latinoamericano Lima-Perú. [Internet] Disponible en: http://www.cnf.org.pe/secretaria_conflat/memorias/DOCUMENTO%20MESAS/MESA%204/Pablo%20Moreno.pdf. [consulta: abril, 2015].
- Moya, C.; Poblet, P.; Valenzuela, L. (2012). Propiedades físicas y mecánicas de compuestos de polietileno reciclado y harinas de corteza y madera de pinus radiata fabricados mediante moldeo por inyección. *Universidad del Bío-Bío. Maderas, Ciencia y tecnología*, 14(1):13-29.
- Navarro, J. F. (2005). Elaboración y evaluación de tableros aglomerado a base de plástico de alta densidad y fibra de estopa de coco. Tesis profesional. Universidad de colima.
- 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. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, S1(4):1453-1460.
- Peredo, M. (2000). Utilización industrial de la madera de *Eucalyptus*. Bioforest S.A. Concepción-Chile.

- Peter, Y.S.; Guoquiang, C.; Sambeek, J.W. (1998). Relationships among growth rate, vessel lumen area, and wood permeability for three central hardwood species. *Forest Products Journal* 48(3):87-90.
- Platt, B.; Lent, T.; Walsh, B. (2005). *Guide to Plastic Lumber*. The Healthy Building Network. Washington, DC. pp: 26.
- Poblete, H. (1985.) Influencia del tamaño de partículas sobre las propiedades mecánicas flexión y, tracción en tableros de partículas aglomerados con ureaformaldehído. Simposio: *Pinus radiata* Investigación en Chile. Tomo II. pp. 241-256.
- Poblete, H.; Peredo, M.; Inzunza, L. (1994). Resistencia a la extracción de tornillos en tableros de partículas fabricados con desechos de especies nativas. *Bosque*, 15(2):77-80.
- Poblete, H. (2001). *Tableros de Partículas*. Editorial El Kultrun. p. 177.
- Poblete, H. (2002). Estudio técnico de la utilización de *Eucalyptus nitens* en la fabricación de contrachapados: ensayo con trozas basales y segundas. Informe de Convenio. UACH - Forestal Mininco S.A. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Austral de Chile. p. 42.
- Poblete, H. (2004). El *nitens* especie latifoliada industrial del futuro. *Lignum* 14(73):30-32.
- Post, P.W. (1961). Relationship of flake size and resin content to mechanical and dimensional properties of flake board. *Forest products Journal* 11(1):34-37.
- Prado, J. y Barros, S. (1991). *Eucalyptus: Principio de Silvicultura y Manejo*. Instituto Forestal. Corporación de Fomento de la Producción. Santiago. Chile. p. 199.
- Raya, A. E. (2014). Caracterización de las propiedades físicas y mecánicas de láminas acanaladas hechas a base de madera y plástico. Tesis profesional. Facultad de ingeniería en Tecnología de la madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Reyes, J. (2005). Comportamiento del Eucalipto *nitens* como especie pulpable. CMPC Celulosa Planta Santa Fe. II. Internacional Colloquium on *Eucalyptus* Pulp. Concepción 24-26 Mayo. pp. 29-36.
- 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.

- Rubyet, M. (2010). Profile extrusion of wood plastic cellular composites and formulation evaluation using compression molding. Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Applied Science. Faculty of Engineering and Applied Science Mechanical Engineering Program. University of Ontario Institute of Technology Oshawa, Ontario, Canada.
- 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.; 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.
- Sánchez, T.; Bocanegra, S. (2006). Manual de Prácticas de laboratorio de física y mecánica de la madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera.
- Sonia (2013). Los tipos de madera según su dureza. Camino a Casa. [Internet]. Disponible en: <http://www.caminoacasa.com/blog/lostiposDemaderasegunsudureza/>. [consulta: abril, 2016].
- Solis, M. y Lisperguer, J. (2002). Compuestos mixtos a base de plásticos y madera. Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Universidad del Bío-Bío. *Wood-Polymer Composites, Theoria*, Vol. 11:35-40.
- Stark, N.; Gardner, D. (2008). Outdoor durability of wood-polymer composites. In *Wood-polymer composites*. Woodhead Publ. Ld., England. p. 1244.
- 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.
- Sullcahuamán, A.; Fuentes, A.; Mateo, M.; Pastor, V.; Castro, N.; Zabaleta, S. “Materiales compuestos de cemento, papel reciclado, quitosano y refuerzo de fibras de sisal químicamente modificadas”, en: 8° Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Lima (2007).
- Tornqvist, R.; Sunderland, P.; Manson, J. (2000), Non-isothermal process rheology of thermoplastic composites for compression flow moulding, *Composites: Part A* 31:917-927.

- Universidad de Vigo. 2014. *Eucalyptus nitens*. [Internet]. Disponible en: <<http://silvicultura.wikispaces.com/Eucalyptus+nitens>>. [consulta: marzo, 2016].
- Úrban, P. (2012). Construcción de estructuras de madera. España. Club Universitario.
- Wambua, P.; Ivens, J.; Verpoest, I. (2003). Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics?. *Composites Science and Technology*, 63:1259-1264.
- Westman, P.; Fifield, S.; Simmons, L.; Laddha, G.; Kafentzis, A. (2010). “Natural fiber composites: a review”, U. S. Department of Energy, Washington.
- Wolcott, M.; Englund, K. (1999). A Technology Review of Wood Plastic Composites. In *Proceeding 33th International Particleboard Composite Material Symposium*. p. 96.
- Xu, X. (2007). Life cycle assessment of wool-fibre-reinforced polypropylene composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 168-177.
- Youngquist, J.A.; Krzysik, A.M.; Muehl, J.H.; Carll, C. (1992). Mechanical and physical properties of air-formed wood-fiber/polymer-fiber composites. *Forest Products Journal*. 42(6):42-48.
- Youngquist, J.; Myers, G. E.; Muehl, J. H.; Krzysik, A. M.; Clemons, C. M. (1995). Composites from Recycled Wood and Plastics. Project Summary. EPA, Engineering Laboratory. Cincinnati, EPA/600/SR95/003. p. 122.
- Youngquist, 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.

10. ANEXOS

Anexo I

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

Clasificación	Densidad (g/cm³)
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

Clasificación de la densidad de la madera según Lincoln (2006)

Densidad (g/cm³)	Clasificación
Menos de 0.30	Excepcionalmente baja
0.30-0.45	Baja
0.45-0.65	Media
0.65-0.80	Alta
0.80-1.00	Muy alta
Mayor de 1.00	Excepcionalmente alta

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

Dureza HD para diferentes materiales a base de madera

MATERIAL	Promedio	Máximo	Mínimo	Desv. Est.	C. V.
	(HD)	(HD)	(HD)	(HD)	(%)
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

LMP: lámina de madera plástico, MDF: fibra de densidad media, OSB: tableros de partícula orientada (Raya, 2014)

Anexo IV

Resistencia a la extracción de tornillos (kg) para diferentes materiales a base de madera

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

LMP: lámina de madera plástico, MDF: fibra de densidad media, OSB: tableros de partícula orientada (Raya, 2014)