

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

ESCUELA DE POSGRADO



"ESTUDIO DEL SINTERIZADO DE MATERIALES COMPUESTOS A PARTIR DE POLIETILENO RECICLADO Y MADERA CAPIRONA RECUPERADA MEDIANTE MOLDEO POR COMPRESIÓN"

Tesis para optar por el grado de:

Magíster en Ingeniería y Ciencia de los Materiales

Presentado por:

César Samuel Gastelo Casal

Asesor:

Dr. Ing. Julio Arnaldo Acosta Sullcahuamán

Jurado:

**Dr. Paul Pedro Lean Sifuentes
Mg. Walter Mariano Tupia Anticona**

Lima – Perú
2018

RESUMEN

A nivel mundial, la industria ha crecido enormemente en sus diferentes sectores, siendo la industria del plástico una de las que ha tenido un crecimiento considerable, entre otros, debido al desarrollo de diferentes tecnologías relacionadas con los diferentes procesos de fabricación, tales como: extrusión, inyección, soplado, moldeo por compresión, moldeo rotacional, los cuales permiten obtener diversos productos útiles para la sociedad. Sin embargo, la inadecuada gestión de residuos generados por estos productos ha incrementado la contaminación ambiental, principalmente en las grandes ciudades del mundo. Al mismo tiempo, como una alternativa de solución a este problema se viene investigando sobre la viabilidad de usar plásticos reciclados y madera recuperada para fabricar materiales compuestos con el propósito de aprovechar estos residuos, a la vez que se contribuye con el cuidado del ambiente.

En este sentido, el objetivo del presente trabajo es el estudio del sinterizado de materiales compuestos obtenidos a partir de polietileno reciclado y madera capirona recuperada fabricados mediante moldeo por compresión.

Este estudio cuenta con tres etapas. En primer lugar se realizó la caracterización de los constituyentes del material compuesto: madera capirona recuperada y polietileno de alta densidad reciclado, según las normas ASTM. En la segunda etapa, según el diseño experimental se fabricaron muestras para diferentes temperaturas de trabajo y tiempos de permanencia en el horno, manteniendo constante el tamaño de partícula (≤ 3.33 mm) y la proporción en volumen: 70% plástico y 30% madera; luego a partir de estas muestras se elaboraron probetas para someterlas a ensayos de flexión, con la finalidad de determinar los valores óptimos de dichos parámetros de sinterizado para la fabricación del material compuesto bajo las condiciones antes mencionadas. Como parte final de la segunda etapa se fabricaron muestras del material compuesto sinterizado utilizando la temperatura y el tiempo de permanencia obtenidos, para evaluar el proceso de sinterizado en función de la proporción en volumen y el tamaño de partícula. Finalmente en la tercera etapa se realizó la caracterización de las muestras ensayadas con los parámetros óptimos.

Se ha realizado el estudio del proceso de sinterizado de materiales compuestos, a partir de polietileno reciclado y madera capirona recuperada mediante moldeo por compresión, habiéndose determinado que los parámetros de proceso más importantes son la temperatura de calentamiento del horno y el tiempo de permanencia en el mismo. A mayores temperaturas y tiempos en el horno el sinterizado se favorece y es limitado por la degradación de los materiales. Se puede reducir el tiempo de calentamiento incrementando la temperatura y viceversa.

El material compuesto de polietileno de alta densidad reciclado y madera capirona recuperada con mejores propiedades mecánicas se obtiene con los siguientes parámetros: 70% de polietileno de alta densidad reciclado y 30% de madera capirona recuperada (% en volumen) de 1.9 mm a 3.3 mm de tamaño, a una temperatura de 175°C y 40 minutos de calentamiento en el horno, 10 minutos de tiempo de enfriamiento bajo una presión de 70 bar. Para estas condiciones, la resistencia a la flexión es 25 MPa y el modulo elástico en flexión es 1293 MPa, la densidad 0.91 g/cm³ y la absorción de agua es 2.2 %.



A

Mis padres:

Gladys Livia y César Antonio

Mi Futura esposa, mi hijo y,

Dios mediante,

los que vendrán:

Diana y Benjamín Matías

Mis hermanos:

Cristina, Jean Pierre

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a Dios, porque siempre supo guiar mis pasos por el camino correcto y porque me ha demostrado que siempre está conmigo en cualquier momento de mi vida.

Agradezco a mis padres, César Gastelo y Gladys Casal, por todo el apoyo brindado durante el estudio de la maestría, a mi hermana Cristina por los ánimos que me brindaba y por la paciencia que siempre me tiene.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYTEC) que, a través del Convenio PUCP-FONDECYT 029-2015, me permitieron estudiar la Maestría en Ingeniería y Ciencia de los Materiales completamente gratis y con una subvención mensual justa.

A la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), por su plana docente de primer nivel y excelentes laboratorios; la PUCP es casa de las grandes oportunidades, me siento privilegiado de haber pasado por sus aulas.

A mi asesor de tesis, Dr. Ing. Julio Acosta Sullcahuamán, por su gran apoyo, por su dedicación, compromiso y optimismo. Estoy profundamente agradecido por haberme mostrado y guiado en este camino difícil de la elaboración de la tesis y por sus sabios consejos como amigo en los momentos más intensos de mi vida durante mi estadía en la PUCP.

A todo el personal del CITE - Materiales PUCP por las facilidades y sugerencias que me dieron para llevar a cabo los ensayos mecánicos, en especial a los Ingenieros Jorge Pajuelo y Kelly Lucas por el apoyo brindado. Asimismo, agradezco al Sr. Paolo Scarpati del taller de la facultad de Arquitectura-PUCP, por el apoyo brindado en el mecanizado de las probetas.

De manera especial agradezco al Magíster Adán Arribasplata por su predisposición, experiencia y consejos para poder culminar esta tesis. Quedo muy agradecido con los integrantes del Laboratorio N° 04, por todas las experiencias y por el apoyo brindado, gracias amigos(as) Daniel, Andoni, Kelly, Luis, Roger, Rosita y Rudy.

Por último y no menos importante. Agradezco desde lo más profundo de mi corazón a Diana Rojas, mi futura esposa y madre de mi hijo que dentro de poco estará con nosotros, gracias por el apoyo incondicional brindado, por ser siempre la persona que me da fuerzas para seguir con mis metas. De la misma manera agradezco a todas aquellas personas, familiares y amigos que me brindaron su apoyo en los momentos más complicados de mi vida durante el desarrollo de la maestría. Gracias por todo el apoyo.

INDICE GENERAL

RESUMEN.....	i
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi

INDICE DE CONTENIDOS

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN.....	1
1. FUNDAMENTOS TEORICOS.....	3
1.1.Gestión de residuos sólidos en el Perú.....	3
1.2.Materiales compuestos.....	5
1.3.Materiales compuestos de matriz polimérica y madera.....	5
1.4.Polietileno (PE).....	6
1.4.1. Tipos de polietileno.....	6
1.4.2. Propiedades del polietileno.....	7
1.5.La madera.....	8
1.5.1. Estructura de la madera.....	8
1.6.Madera capirona.....	10
1.6.1. Características organolépticas.....	12
1.6.2. Propiedades físicas y mecánicas de la capirona.....	12
1.6.3. Aplicaciones de la capirona.....	13
1.7.Procesos de manufactura de los CPM.....	13
1.7.1. Extrusión.....	13
1.7.2. Inyección.....	14
1.7.3. Moldeo por compresión.....	16
1.7.4. Parámetros que influyen en la fabricación de los materiales compuestos plástico-madera(CPM).....	17
1.8.Sinterizado de los polímeros.....	18
1.8.1. Etapas del sinterizado.....	19

1.8.2. Estudio del sinterizado en la elaboración de materiales compuestos plástico-madera (CPM).....	20
1.8.3. Métodos de análisis del sinterizado.....	21
1.9. Aplicaciones de los materiales compuestos de plástico y madera.	22
2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	25
2.1. Materiales	25
2.1.1. Partículas de madera capirona	25
2.1.2. Partículas de plástico.....	26
2.2. Etapa 1: Caracterización de los materiales.....	27
2.2.1. Caracterización de la madera capirona	27
I. Equipos e instrumentos empleados	27
II. Determinación de la densidad de la madera.....	28
III. Ensayo de absorción de agua de la madera.....	29
2.2.2. Caracterización del polietileno	29
I. Equipos empleados	29
II. Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR-ATR).....	31
III. Índice de fluidez (IFM)	32
IV. Calorimetría diferencial de barrido (DSC).....	32
V. Análisis termo gravimétrico (TGA).....	33
2.3. Diseño experimental.....	33
2.4. Etapa 2: Fabricación de muestras de la parte experimental I y II.....	35
2.4.1. Fabricación de muestras a partir de polietileno reciclado y partículas de madera capirona recuperada.....	35
I. Equipos.....	35
II. Determinación de la cantidad de partículas de madera Capirona recuperada y de polietileno.....	39
III. Mezclado de las partículas de madera capirona y polietileno..	39
IV. Aplicación del desmoldante.....	40
V. Precalentamiento del molde.....	41
VI. Carga de la muestra y calentamiento a la temperatura de trabajo.....	41
VII. Prensado y enfriamiento del molde.....	42

VIII.	Extracción de la muestra.....	43
IX.	Rotulado de muestras.....	43
2.4.2.	Fabricación de probetas	45
2.5.	Etapa 3: Análisis del material compuesto.....	45
2.5.1.	Ensayos de los materiales compuestos	45
I.	Ensayo de flexión	46
II.	Ensayo de densidad	47
III.	Ensayo de absorción de agua	48
2.5.2.	Caracterización del material compuesto de mejores propiedades.....	49
I.	Equipos empleados.....	49
3.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	50
3.1.	Caracterización de la madera capirona.....	50
3.1.1.	Densidad de la madera Capirona.....	51
3.1.2.	Absorción de agua de la madera.....	51
3.2.	Caracterización del polietileno	52
3.2.1.	Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier.....	52
3.2.2.	Índice de fluidez (MFI)	52
3.2.3.	Calorimetría diferencial de Barrido.....	53
3.2.4.	Análisis Térmico gravimétrico (TGA)	55
3.3.	Determinación de los parámetros del proceso de sinterizado	55
3.4.	Resultados de los ensayos de los materiales compuesto fabricado	62
3.4.1.	Ensayo de flexión.....	63
3.4.2.	Ensayo de densidad.....	67
3.4.3.	Ensayo de absorción de agua.....	70
3.4.4.	Análisis térmico	72
3.4.5.	Estereoscopio óptico	72
	CONCLUSIONES	74
	BIBLIOGRAFIA	76

INDICE DE FIGURAS

CAPITULO I

Figura 1.1. Estructura macroscópica del tronco.....	9
Figura 1.2. Los principales ejes de la madera.....	10
Figura 1.3. Representación esquemática de moldeo por extrusión.....	14
Figura 1.4. Perfiles fabricados de CPM mediante extrusión.....	14
Figura 1.5. Esquema de Moldeo por inyección	15
Figura 1.6. Productos moldeados por inyección.....	16
Figura 1.7. a) Sistema de moldeo por compresión. b) producto moldeado por compresión.....	16
Figura 1.8. Microfotografías ópticas de partículas de polímero antes y durante la sintonización a 200°C. a) PS. b) PMMA.....	18
Figura 1.9. Las variables iniciales de cada partícula, donde “a0” es el radio, “x” es el radio del cuello, “y” es la distancia del cuello al centro de la partícula y θ es el ángulo de coalescencia.....	19
Figura 1.10. Microfotografía óptica de coalescencia de partículas de polipropileno.....	20
Figura 1.11. Evolución de la temperatura del aire que rodea al molde (curva H), temperatura del molde (curva X) y temperatura del interior del molde (curva Y) durante el ciclo de moldeo.....	21
Figura 1.12. a) 80% de pellets de polipropileno y polvo de madera (b) planchas de plataforma de perfil sólido (c) dos perfiles huecos con diferentes texturas de grano de madera (d) núcleo de menor densidad en un perfil de espuma extruido.....	22
Figura 1.13. Tableros de cubierta de wood plastic composites de diferentes formas	23
Figura 1.14. Diferentes piezas de autos, sillas, tableros.....	23

Figura 1.15. El uso de lignocelulósicos como rellenos de refuerzo permite que los termoplásticos se moldeen en una amplia variedad de formas.....	23
---	----

CAPITULO II

Figura 2.1. Partículas de madera capirona	25
Figura 2.2. Tapas roscas de polietileno.....	26
Figura 2.3. Polietileno Picado.....	26
Figura 2.4. a) Clasificación de tamices. b) Tamiz MR2	27
Figura 2.5. Balanza Analítica.....	28
Figura 2.6. Equipo de FTIR-ATR.....	30
Figura 2.7. Equipo de Índice de Fluidez.....	30
Figura 2.8. Maquina DSC.....	31
Figura 2.9. Proceso de ensayo de FTIR-ATR del polietileno.....	32
Figura 2.10. a) Horno Eléctrico exterior. b) Resistencias del horno.....	36
Figura 2.11. Prensa hidráulica.....	36
Figura 2.12. Molde de alumod.....	37
Figura 2.13. Sistema de extracción.....	37
Figura 2.14. Sistema de transporte	38
Figura 2.15. Desmoldante.....	38
Figura 2.16. Mezcla Homogénea del plástico-madera.....	40
Figura 2.17. Aplicación del desmoldante.....	40
Figura 2.18 Precalentamiento del molde.....	41
Figura 2.19. Mezcla dentro del molde.....	41
Figura 2.20. Molde precalentando cargado con su tapa antes de ingresar al horno.....	42

Figura 2.21. Prensado del molde.....	42
Figura 2.22. Extracción de la muestra.....	43
Figura 2.23. a) Muestra final. b) muestra rotulada primera parte.....	44
Figura 2.24. Corte de la muestra para obtener 2 probetas de ensayo para flexión.....	45
Figura 2.25. Máquina de Flexión Zwick/ Roell Z050.....	46
Figura 2.26. a) Flexión de Polietileno puro. b) Flexión de material compuesto.....	46
Figura 2.27. Peso de la muestra sumergida con el lastre.....	48
Figura 2.28 Ensayo de Absorción de agua del material compuesto.....	49
Figura 2.29. Estereoscopio óptico.....	49

CAPITULO III

Figura 3.1. Espectros FTIR-ATR del polietileno.....	52
Figura 3.2. DSC del Polietileno en calentamiento.....	54
Figura 3.3. DSC del polietileno en enfriamiento.....	54
Figura 3.4. TGA del polietileno de alta densidad	55
Figura 3.5. Probetas moldeadas a tiempos diferentes. (Sección transversal).....	58
Figura 3.6. Modulo elástico en flexión en función del tw de trabajo.....	59
Figura 3.7. Resistencia a la flexión en función del tw de trabajo.....	60
Figura 3.8. Modulo elástico en flexión vs tiempo de calentamiento.....	61
Figura 3.9. Resistencia Máxima a la Flexión vs Tiempo de calentamiento.....	61
Figura 3.10. Módulo Elástico Vs % madera capirona, tamaño MR2 ($\leq 3.33\text{mm}$).....	65
Figura 3.11. Resistencia máxima a la flexión vs % madera capirona MR2 ($\leq 3.33\text{mm}$).....	65
Figura 3.12. Resistencia Máxima a la flexión vs tamaño de partícula.....	66
Figura 3.13. Módulo Elástico en Flexión vs Tamaño de partículas.....	67

Figura 3.14. Densidad Vs % de Madera Capirona (MR2).....	69
Figura 3.15. Densidad del Compuesto vs Tamaño de Partícula de madera.....	69
Figura 3.16. Absorción de agua Vs % de Madera Capirona (MR1).....	71
Figura 3.17. Absorción de agua vs Tamaño de Partícula de madera.....	71
Figura 3.18. Análisis Termo gravimétrico del Compuesto (TGA).....	72
Figura 3.19. Vista al estereoscopio óptico en diferentes aumentos (12.5X, 20X y 40X) de la muestra con mejores propiedades, se observa que las partículas de madera están embebidas por el plástico. Se observa una buena adhesión.....	72



INDICE DE TABLAS

CAPITULO I

Tabla 1.1. Propiedades del LDPE.....	7
Tabla 1.2. Propiedades del HDPE.....	8
Tabla 1.3. Propiedades Físicas de la capirona.....	12
Tabla 1.4. Propiedades Mecánicas de la capirona.....	12
Tabla 1.5. Componentes de las fibras de madera.....	17

CAPITULO II

Tabla 2.1. Características de la madera capirona.....	26
Tabla 2.2. Características de las mallas utilizadas en el tamizado de la madera Capirona.....	28
Tabla 2.3. Parámetros de ensayo para el equipo DSC.....	33
Tabla 2.4. Cantidad de muestras a realizar en la parte experimental N°1	34
Tabla 2.5. Cantidad de muestras a realizar en la parte experimental N°2.....	35
Tabla 2.6. Cantidad de plástico y madera de acuerdo a los porcentajes en volumen.....	39
Tabla 2.7. Ensayos y normas ASTM utilizadas.....	45

CAPITULO III

Tabla 3.1. Características de la madera capirona.....	50
Tabla 3.2. Densidad de la madera capirona.....	51
Tabla 3.3. Densidad de la madera capirona en distintas investigaciones.....	51

Tabla 3.4. Valores de absorción de agua de la madera capirona	52
Tabla 3.5. Índices de fluidez del PEADV y PEADR.....	53
Tabla 3.6. Propiedades térmicas del Polietileno.....	53
Tabla 3.7. Variables involucradas en el proceso de sinterizado.....	56
Tabla 3.8. Temperaturas y tiempos de trabajo (Parte experimental I).....	57
Tabla 3.9. Resistencia y módulo Elástico de flexión (70% -30%) a 145°C.....	58
Tabla 3.10. Resistencia y módulo Elástico de flexión (70%-30%) a 155°C.....	58
Tabla 3.11. Resistencia y módulo Elástico de flexión (70% -30%) a 165°C.....	59
Tabla 3.12. Resistencia y módulo Elástico de flexión (70%-30%) a 175°C.....	59
Tabla 3.13. Resistencia y módulo Elástico de flexión (70%PE-30%MC) a 185°C.....	59
Tabla 3.14. Condiciones óptimas de Sinterizado de material compuesto de polietileno y partículas de madera capirona	62
Tabla 3.15. Distribución de muestras moldeadas en la segunda parte experimental	62
Tabla 3.16. Ensayos físicos realizados para la caracterización del material compuesto.	63
Tabla 3.17. Valores de Módulo Elástico de las muestra (segunda parte).....	63
Tabla 3.18. Valores de la Resistencia Máxima a la flexión (segunda parte).....	64
Tabla 3.19. Resultados de Densidad del material compuesto.....	68
Tabla 3.20. Resultados de Absorción de agua del material compuesto.....	70

INTRODUCCION

En nuestro país el consumo diario del ser humano y la gran variedad de procesos que hay en nuestra industria generan una gran cantidad de residuos sólidos. Aun teniendo en cuenta que en la actualidad el Perú cuenta con una gestión en el área de reciclaje se estima que mensualmente se generen aproximadamente más de 10 mil toneladas de residuos sólidos por mes. La generación per cápita (GPC) de residuos sólidos se estimó en 0.61kg /hab. /día en promedio. (SINIA, 2013)

Todo radica en el bajo nivel de conocimiento en la reutilización y reciclaje de algunos desechos como los residuos de las industrias madereras y residuos plásticos, dado que si se tuviera los hábitos de reutilizar estos desechos se estaría disminuyendo la contaminación ambiental producida por la aglomeración de dichos residuos.

A nivel mundial se vienen haciendo investigaciones sobre la viabilidad de usar plástico reciclado con madera reciclada para crear materiales compuestos a los cuales se les puede dar un nuevo uso.

La posibilidad de utilizar residuos sólidos en el desarrollo de materiales compuestos es muy atractivo, especialmente con respecto a la gran cantidad de residuos plásticos generados diariamente. Por lo tanto, el desarrollo de nuevos productos utilizando los plásticos recuperados, está teniendo mayor importancia. La adición de fibras o partículas de madera recicladas a los residuos plásticos hace que los materiales compuestos resultantes tengan buenas propiedades mecánicas y un mejor impacto ambiental. Además, los productos de material compuesto pueden ser recuperados y reciclados para la producción de materiales compuestos de segunda generación. (Alireza A., 2008)

El enfoque básico en países asiáticos con respecto a la disposición de residuos sólidos son (1) la prevención de residuos y la minimización, (2) la promoción del reciclaje y (3) la disposición final ambientalmente adecuada. La generación de residuos es controlado en la fuente por los hogares y las empresas de negocios, donde se origina el residuo. Componentes reciclables de este tipo de residuos se desechan por separado para facilitar el reciclaje. (Pacheco, E., 2000)

En 2006, la cantidad de papel y cartón y los plásticos en los países como Irán alcanzó 18.600 y 9.400 toneladas, que comprende 22,1% y 11,2% en peso de los residuos, respectivamente. De los plásticos, polietileno de alta densidad (HDPE), además de polipropileno (PP) es el componente más grande, seguido por tereftalato de polietileno (PET), poliestireno (PS) y polietileno de baja densidad (LDPE). (Alireza A., 2009)

Estos son la mayoría de plásticos que pueden ser reciclados para que se le dé un nuevo uso o para ser parte de una mezcla para formar un nuevo material compuesto.

Esta investigación espera obtener un material compuesto con propiedades cercanas a la de los componentes por separado, mediante el proceso de moldeo por compresión a temperaturas cercanas a la temperatura de fusión, ahorrando energía en comparación con otros procesos, además de que con esto se está reduciendo el impacto ambiental ya que son productos reciclados los que se usan como materia prima, los cuales son polietileno reciclado y madera capirona recuperada.

El objetivo de este trabajo es el estudio del sinterizado de materiales compuestos obtenidos a partir de polietileno reciclado y madera capirona recuperada fabricados mediante moldeo por compresión.

Los objetivos específicos son:

- Elaborar una metodología experimental que permita determinar los parámetros involucrados en el proceso de sinterizado de materiales compuestos mediante moldeo por compresión
- Investigar el estado del arte de los materiales compuestos de plástico y madera.
- Realizar la caracterización del polietileno de alta densidad reciclado y la madera capirona recuperada siguiendo ensayos normalizados.
- Realizar pruebas de moldeo por compresión de acuerdo al diseño experimental con la finalidad de determinar los parámetros del sinterizado de los materiales mencionados.
- Realizar el mecanizado de las muestras con el fin de llevar a cabo el ensayo de control que permita identificar los parámetros de proceso adecuados para la fabricación de nuevos materiales compuestos con propiedades adecuadas para su posible uso en la industria.
- Discutir los ensayos y verificar si la presente investigación ha cumplido con los objetivos planteados.

Como resultados se espera obtener las mejores condiciones de proceso de sinterizado del material compuesto procesado mediante moldeo por compresión además del efecto que produce en las propiedades cualquier variación de los parámetros de proceso.

La estructura de esta tesis es la siguiente:

Capítulo I:

Este capítulo presentará los fundamentos teóricos sobre los materiales involucrados en la investigación, los procesos de fabricación más comunes y las aplicaciones.

Capítulo II:

Se desarrollará la metodología experimental de la tesis, procedimientos realizados para la caracterización de la materia prima, fabricación de muestras y mecanizado de probetas de los materiales compuestos sinterizados y ensayos de acuerdo a las normas ASTM.

Capítulo III:

En este capítulo se presenta los resultados obtenidos, el análisis y discusión de los mismos a través de diferentes gráficos.

Por último se presentan las conclusiones obtenidas a partir del análisis realizado de los resultados.

CAPITULO I

1. FUNDAMENTOS TEORICOS

“En cada ecosistema existen Productores-Consumidores y descomponedores que permiten que los principales elementos, necesarios para la vida, se reciclen. En la naturaleza los desechos son constantemente reaprovechados” (Sinia-Ministerio del ambiente, 2008). Todo es reciclado y estos métodos permiten proteger los recursos naturales en escases del planeta y disminuir el impacto ambiental.

Los materiales compuestos de materia prima reciclada han incrementado la investigación y actualmente tienen diversas aplicaciones, sean decorativas, estructurales y con buenas propiedades, además se obtienen ciertas ventajas tanto económicas como en propiedades mecánicas.

1.1. Gestión de residuos sólidos en el Perú

En el Perú, el ministerio del ambiente es el que se encarga de la gestión de residuos sólidos, la cual trata de disminuir el impacto ambiental. Según el ministerio del ambiente (2008) se describe:

La gestión ecológicamente racional de los desechos sólidos debe ir más allá de la simple eliminación o su aprovechamiento, por métodos seguros. La solución se remonta a resolver la causa fundamental del problema intentando cambiar las pautas no sostenibles de la producción y consumo de bienes y servicios. Ello entraña la aplicación del concepto de gestión integrada del ciclo vital que representa una oportunidad única de conciliar el desarrollo con la protección del medio ambiente. (p.73)

De acuerdo a la evaluación de la gestión de los residuos sólidos en el Perú, la generación per cápita (GPC) promedio de residuos sólidos domiciliarios, se incrementa proporcionalmente al crecimiento de la economía. En el Perú, la generación per cápita se ha incrementado de 0.529 Kg/hab/día en el año 2001 a 0.7 Kg/hab/día, en el año 2007. Asimismo, la generación de residuos sólidos municipales, en general, pasó de 0.711 Kg/hab/día en el año 2001 a 1.08 Kg/hab/día, en el año 2007. Por consiguiente, se aprecia que ha habido un incremento de la GPC de 51.9% en 7 años, lo que en promedio equivale a una tasa de crecimiento anual del 6.15%. Ante el incremento de la demanda del servicio del manejo y gestión de residuos sólidos, la oferta que actualmente existe en el país debe incrementarse. (p.73)

En cuanto a las actividades de reciclaje y/o reaprovechamiento, éstas actualmente son poco significativas y, por lo general, se realizan de manera informal, lo cual requiere también una intervención para su formalización, tecnificación e incorporación práctica en los sistemas de gestión integral de residuos sólidos

municipales; de tal manera que, se disminuyan los volúmenes a ser dispuestos en rellenos sanitarios. La composición de los residuos sólidos del futuro se proyecta a una composición de residuos con mayores características para el reciclaje. En este contexto el eco eficiencia debe contribuir a mejorar la calidad de vida y a disminuir la generación de residuos sólidos. (p.73)

Esta gestión implica considerar todas las etapas del manejo de los residuos sólidos como un todo y no como una suma de partes, abordándose la problemática ambiental de los residuos sólidos de manera mucho más eficiente. De este modo, existe un orden para abordar el problema, el cual se debe iniciar por la prevención, lo que supone estar preparado para tomar las acciones del caso; luego, la minimización de impactos y residuos. Así, por ejemplo, se identifica los puntos en los cuales se contamina y se intenta reducirlos lo más posible. El paso siguiente es la reutilización y reciclaje, donde se busca volver a usar los residuos. Por ejemplo, usar retazos de telas para confeccionar cojines o la transformación de residuos orgánicos para obtener compost. Luego, sigue el proceso de tratamiento, por el cual se pretende reducir los componentes dañinos contenidos en los residuos y que pueden dañar el ambiente. La última etapa es la disposición final segura de los residuos. (p.75)

1.2. Materiales compuestos

“Un material compuesto es un sistema integrado por una mezcla o combinación de dos o más micro o macro constituyentes que difieren en forma y composición química y que son esencialmente insolubles entre sí” (Tino R. T. 2010, p.43).

La importancia de los materiales compuestos es muy grande ya que se combinan las propiedades de los materiales constituyentes cuando se diseña y se fabrica el material compuesto correctamente. La mayor parte de los materiales compuestos están formados por dos o más fases, una matriz continua que rodea a las demás fases que se denominan fases dispersas y que se clasifican en función de su microestructura o geometría. La microestructura de la fase dispersa incluye la forma, tamaño, distribución y orientación de las partículas. Cuando se dan las proporciones de material matriz y material disperso hay que distinguir claramente entre relaciones en peso o en volumen ya que las densidades de estas fases pueden ser muy diferentes. (Universidad de Málaga, 2004-2005, p.1)

Los compuestos pueden ser reforzados por partículas y fibras, de las cuales las partículas poseen propiedades isotrópicas y las fibras poseen propiedades como resistencia, rigidez y propiedades físicas diferentes a la orientación del material. (Dai, D., 2014)

1.3. Materiales compuestos de matriz polimérica y madera

“Los compuestos de madera y plástico, llamados también Wood-Plastic-Composites (WPC), son compuestos que han sido estudiados en países como Estados Unidos, Europa, entre otros. Su uso ha sido exclusivamente para el diseño de placas, perfiles, tableros, marcos, etc.” (Weschslers A., 2007).

“Estos materiales compuestos pueden procesarse de diferentes formas como los plásticos puros, en procesos como extrusión, compresión y moldeo rotacional cuyas tecnologías son muy usadas por bajos costos del proceso. Con estos procesos tenemos como resultados un producto resistente a la degradación biológica, mejor resistencia térmica y mejor resistencia al creep, comparándolos con los plásticos puros” (Madsen, D.A. 2011).

1.4. Polietileno (PE)

El polietileno (PE) es químicamente el polímero más simple. Se representa con su unidad repetitiva $(\text{CH}_2\text{-CH}_2)_n$.

Es uno de los plásticos más comunes debido a su bajo precio y simplicidad en su fabricación, lo que genera una producción de aproximadamente 80 millones de toneladas anuales alrededor del mundo. Es químicamente inerte. Se obtiene de la polimerización del etileno (de fórmula química $\text{CH}_2=\text{CH}_2$ y llamado eteno por la IUPAC), del que deriva su nombre.

Este polímero puede ser producido por diferentes reacciones de polimerización, como por ejemplo: Polimerización por radicales libres, polimerización aniónica, polimerización por coordinación de iones o polimerización catiónica. Cada uno de estos mecanismos de reacción produce un tipo diferente de polietileno. (Depuravallés S.L., 2017)

Este polímero es parcialmente cristalino, flexible y sus propiedades son fuertemente influenciadas por la cantidad relativa de las fases amorfa y cristalina. Los polietilenos son inertes frente a varios productos químicos comunes, debido a su naturaleza parafina, su alto peso molecular y su estructura parcialmente cristalina. (Neves, C.J. 1999).

En condiciones normales, los polímeros de etileno no son tóxicos, pueden ser usados incluso en contacto con productos alimenticios y farmacéuticos, no obstante ciertos agregados químicos pueden ser agresivos y degradar el material.

En la actualidad los polietilenos son descritos por polietilenos ramificados y polietilenos lineales. (Silva, A. L.1999)

1.4.1. Tipos de polietileno

El polietileno se produce en tres tipos clasificados por su densidad:

- Polietileno de baja densidad (LDPE): $0.910\text{-}0.925 \text{ g/cm}^3$

- Polietileno de media densidad (MDPE): 0.926-0.940 g/cm³
- Polietileno de alta densidad (HDPE): 0.9411-0.965 g/cm³

a) Polietileno de baja densidad.

“El proceso de producción del polietileno de baja densidad utiliza presiones entre 1000 y 3000 atmosferas y temperaturas entre 370-570K, rango en el cual no son utilizadas, pues el polímero tiende a degradarse. La reacción es altamente exotérmica y así una de las principales dificultades del proceso es la remoción del exceso de calor del medio” (Malpass, D. 2010).

Esa naturaleza altamente exotérmica de la reacción a altas presiones conduce a una gran cantidad de ramificaciones de la cadena, las cuales tienen una importante relación con las propiedades del polímero. “En la actualidad las ramificaciones de cadena larga pueden ser producidas por catalizadores metalocénicos” (Maier, 1993).

Este polímero es parcialmente cristalino (50-60%) y su temperatura de fusión esta entre 1110-115°C.

b) Polietileno de alta densidad.

En el polietileno de alta densidad la linealidad de sus cadenas hace que la orientación, el alineamiento y el empaquetamiento sean más eficientes, de esta forma las fuerzas intermoleculares actúan intensamente y como resultado de esto se logra una mayor cristalinidad, la cual trae como consecuencia que la temperatura de fusión sea más alta. Debido a la cristalinidad y a la diferencia del índice de refracción entre las fases cristalina y amorfa, la película del polietileno de alta densidad es más delgada y menos transparentes que la del polietileno de baja densidad. (Doak, K. W. 1986)

1.4.2. Propiedades del polietileno

Cada tipo de polietileno tiene propiedades diferentes que los caracterizan, las cuales se muestran a continuación:

a. Propiedades del LDPE:

Para este tipo de polietileno existen propiedades únicas como la tenacidad, alta resistencia al impacto, alta flexibilidad.

En la tabla 1.1 se presentan las propiedades físicas y mecánicas del LDPE con valores comprendidos en intervalos que dependen de la temperatura y de la densidad.

Tabla 1.1 Propiedades del LDPE [Doak K. W. 1986]

PROPIEDADES	METODO ASTM	LDPE
Densidad (g/cm ³)	D792	0.912-0.925
Temperatura de fusión (°C)	-----	102-112
Índice de refracción (nD)	D542	1.51-1.52
Resistencia a la tracción (MPa)	D638	6.9-16
Elongación máxima (%)	D638	100-800
Módulo elástico (MPa)	D638	102-240
Dureza, shore D	D676	40-50

Este polietileno puede ser procesado por extrusión, moldeo por soplado y moldeo por inyección y tiene como aplicaciones embalajes, empaques industriales, empaques para alimentos y para productos farmacéuticos.

b. Propiedades del HDPE

El polietileno de alta densidad es conocido por ser un polímero lineal, sin embargo bajo ciertas condiciones de polimerización se puede obtener un cierto grado de ramificación, el cual varía las fuerzas intermoleculares y la resistencia a la tracción.

Este polímero es utilizado en la industria de transformaciones de plástico mediante procesos de moldeo por soplado, inyección y extracción obteniendo así productos tales como envases, frascos, tuberías, etc.

En la siguiente tabla se observa las propiedades físicas y mecánicas del polietileno.

Tabla 1.2 Propiedades del HDPE [Doak K. W. 1986]

PROPIEDADES	METODO ASTM	HDPE (Lineal)	HDPE (Bajo grado de ramificación)
Densidad (g/cm ³)	D792	0.962-0.968	0.950-0.960
Temperatura de fusión (°C)	-----	128-135	125-132
Índice de refracción (nD)	D542	1.54	1.53
Resistencia a la tracción (MPa)	D638	25-45	20-40
Resistencia al cizallamiento (MPa)	-----	20-38	20-36
Resistencia dieléctrica (kV/mm)	-----	45-55	45-55
Dureza, Brinell (MPa)	D676	60-70	50-60

1.5. La madera

“La madera se clasifica como material lignocelulósico. Está compuesto por componentes principales (celulosa, hemicelulosa y lignina) y componentes menores (cenizas y extractos). Los principales constituyentes son componentes estructurales con un alto peso molecular. La madera contiene aproximadamente

60-75% de celulosa, 20-30% de lignina, 1-10% de extracto y 0-0.5% de ceniza. La composición química de la madera varía entre las especies” (Matuana, L.M. 2015).

1.5.1. Estructura de la madera.

“Un árbol es considerado un vegetal leñoso con un tallo simple, llamado tronco, en su parte inferior, y ramificado en su parte superior (copa)” (Dai, D, 2014).

Por madera se entiende la parte sólida de los árboles que se encuentra debajo de la corteza. De esta forma se puede definir que la madera es el conjunto de tejidos, de cierta dureza, que constituyen la mayor parte del tronco y las ramas del árbol. La madera es un material fibroso formado por:

- Celulosa (50%)
- Lignina, que es el elemento que mantiene unidas a las fibras (30%). Es como el “cemento” de la madera.
- Otros elementos: resina, agua, almidón. (20%)

Si se hace un corte transversal a un tronco de un árbol, se distingue las siguientes partes, de dentro a fuera las cuales se describen de acuerdo a Matuana, L. (2009), Stark, N. (2001) y se pueden observar en la figura 1.1

- ❖ **Médula o duramen:** Formada por células muertas que están muy lignificadas. Su aspecto es seco y duro.
- ❖ **Albura o leño:** De aspecto blanquecino, formada por células vivas en su parte exterior y es el responsable del transporte de la savia bruta desde la raíz del árbol hasta las partes aéreas. Durante el crecimiento del árbol, las células interiores mueren y pasan a engrosar el duramen.
- ❖ **Cambium:** Capa de células vivas entre la albura y la corteza interna. Durante su crecimiento da lugar a la formación de la albura y a nuevas células de la corteza interna.
- ❖ **Corteza interna:** Es por donde circula la savia elaborada; está formada por células que poco a poco se desplazan al exterior formando la corteza externa. También se denomina floema o líber.
- ❖ **Corteza externa:** Formada por una capa de células muertas, que protege al árbol contra las inclemencias del tiempo y del ataque de insectos y parásitos.

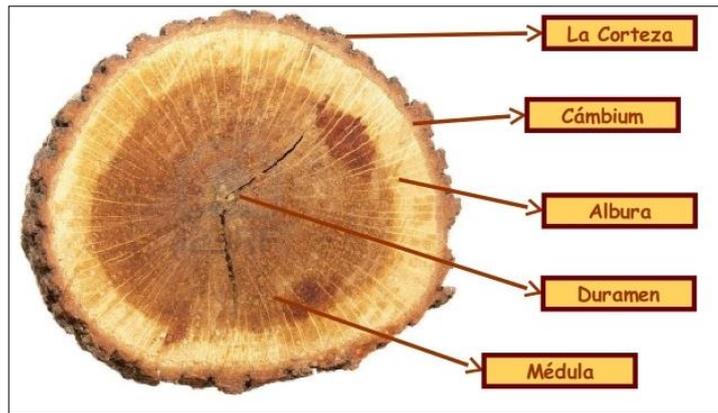


Figura 1.1. Estructura macroscópica del tronco. (Olananmi, E. 2016)

La madera se describe como un material ortotrópico, es decir que tiene propiedades únicas e independientes en las direcciones longitudinal, transversal y tangencial. Se puede observar en la figura 1.2, que el eje longitudinal se considera en la dirección paralela a la fibra, el eje radial está relacionado con la dirección de los anillos y el eje tangencial es perpendicular a la fibra pero tangente al crecimiento de los anillos.

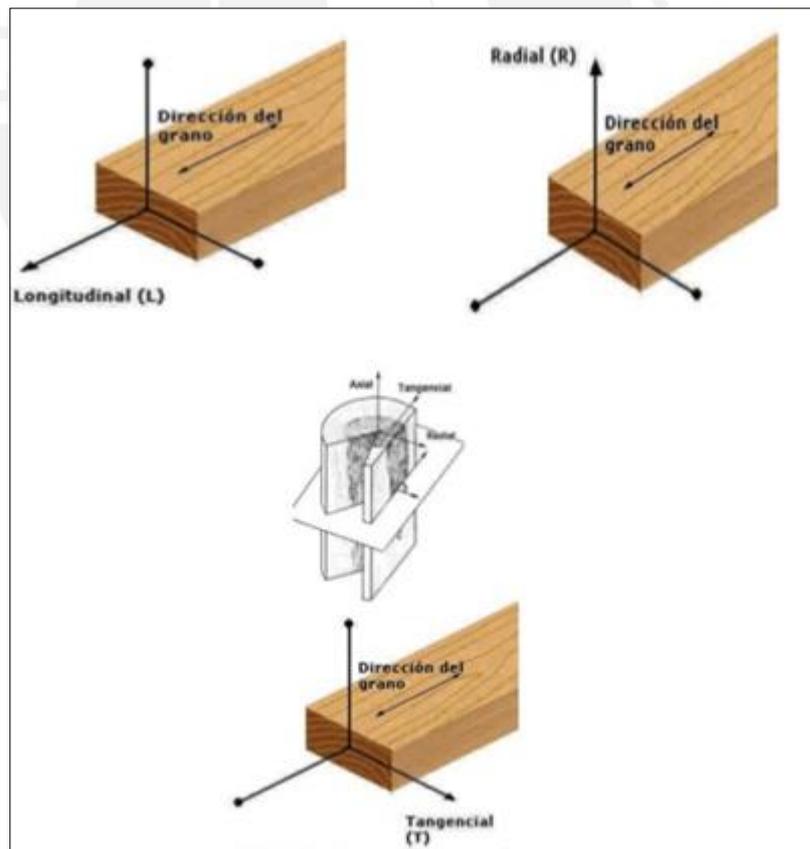


Figura 1.2. Los principales ejes de la madera. (Green, D. 1999)

“En la industria se aprovecha casi exclusivamente el tronco del árbol por tener mayores aplicaciones. Excepcionalmente se aprovechan las raíces y ramas gruesas para la obtención de maderas finas, con veteados espectaculares, en la construcción de muebles de diseño” (I.E.S. Villalba Hervás- La madera, 2010, p2).

1.6. Madera capirona

La madera capirona es conocida como *Calycophyllum spruceanum* [(Benth) Hook f. ex Schumann,] y pertenece a la familia de Rubiaceae.

Es conocida en el Perú como Capirona Negra o Palo Mulato, en Bolivia como Guayabochi o Palo Blanco, en Argentina como Ibiro Moroti, en Brasil como Pau Mulato o Bayabichi, en Colombia como Capirona de Altura o Guayabete, en Ecuador como Capirona o Corusicao y en Venezuela como Araguato y nivel internacional tiene el nombre comercial de Pau Mulato.

La Capirona se encuentra en los bosques primarios y secundarios de la Amazonía del Perú y Brasil, en terrenos periódicamente inundados o no y en las formaciones ecológicas de bosque seco tropical (bs-T), bosque húmedo tropical (bh-T) y bosque muy húmedo tropical (bmh-T), por debajo de los 1 200 metros sobre el nivel del mar. Es común en bosques secundarios, pioneros y tardíos en los departamentos de Amazonas, San Martín, Huánuco, Madre de Dios, Loreto y Ucayali. La especie es heliofita “amiga del sol” y vive asociada a otras especies tales como Quinilla, Shihuahuaco, Quina Quina, entre otras. Crece en comunidades denominadas “capironales”, en suelos pedregosos, mayormente limosos o arenosos, aluviales y fértiles, en bosques ribereños, temporalmente inundados. Existe en regulares cantidades en la Amazonía del Perú, según los resultados de los inventarios forestales disponibles y de acuerdo a las zonas. El volumen bruto estimado de la Capirona asciende a 4,5 m³/ha.

El árbol de capirona alcanza 35 metros de altura total y 0,60 a 1,20 metros de diámetro a la altura del pecho. Presenta tronco de fuste recto, cilíndrico y la copa globosa en el último tercio. La corteza interna es homogénea y delgada, de color crema verduzco, la corteza externa es tersa y lustrosa de color marrón verdoso, provisto de ritidoma papiráceo rojizo que al desprenderse en placas coriáceas expone el tronco blanco grisáceo, por ello también se le conoce como “Palo Mulato”. En el bosque esta especie es inconfundible por su corteza y aspecto gigante. (Plantar - Consorcio Agroforestal, 2008, p.5)

1.6.1. Características organolépticas

Color: El tronco recién cortado presenta capas externas de madera (albura) de color blanco cremoso, similar a las capas internas (duramen), no observándose entre ambas capas contraste en el color.

En la madera seca al aire la albura se torna de color blanco HUE 8/2 10YR y el duramen marrón muy pálido HUE 8/3 10YR. (Munsell Soil Color Charts).

Olor: No distintivo.

Lustre o brillo: Moderado.

Grano: Recto.

Textura: Media.

Veteado o figura: Arcos superpuestos formado por anillos de crecimiento (Plantar - Consorcio Agroforestal, 2008, p.6)

1.6.2. Propiedades físicas y mecánicas de la capirona.

En las siguientes tablas 1.3 y 1.4 se muestran las propiedades físicas y mecánicas de la capirona encontradas en investigaciones anteriores:

Tabla 1.3 Propiedades Físicas de la capirona.((Plantar - Consorcio Agroforestal, 2008, p7)

Densidad básica	0.76 g/cm³	Alta
Contracción tangencial	9.0 %	
Contracción radial	5.0%	
Contracción volumétrica	15.0%	Alta
Relación T/R	1.80	Estable

La resistencia mecánica de la capirona se sitúa en el límite de la categoría media a alta.

Tabla 1.4 Propiedades Mecánicas de la capirona (Plantar -Consorcio Agroforestal, 2008, p.7)

Módulo de elasticidad en flexión	150000 kg/cm²	Poco rígida a rígida
Módulo de rotura en flexión	723 kg/cm ²	Mediana.
Compresión paralela (RM)	283 kg/cm ²	Mediana.
Compresión perpendicular (ELP)	67 kg/cm ²	Mediana.
Corte paralelo a las fibras	87 kg/cm ²	Mediana.
Dureza en los lados	425 kg/cm ²	Mediana.
Tenacidad (resistencia al choque)	2.10 kg-m	Mediana.

1.6.3. Aplicaciones de la capirona.

Teniendo en cuenta que la madera capirona es una madera dura y de buena estabilidad térmica tiene aplicaciones muy interesantes.

La madera Capirona se puede utilizar en ebanistería, pisos, puertas, ventanas, parquet, molduras, tarugos, construcción naval, estructuras pesadas vigas, viguetas y columnas, machihembrados, carrocerías, tornería, artículos deportivos raquetas de tenis y ping pong, mangos de

herramientas, artesanía y enseres que tienen contacto con alimentos (cucharones, agitadores y tablas para picar). (Plantar -Consortio Agroforestal, 2008, p.17)

1.7. Procesos de manufactura de los materiales compuestos plástico-madera (CPM)

Algunos de los procesos utilizados para la fabricación de materiales compuestos son: moldeo por compresión, inyección, moldeo rotacional, extrusión, entre otros. En el moldeo por compresión se utiliza una cantidad de material determinada, la cual es colocada en un molde al cual se le aplica calor y posteriormente presión hasta que el material tome la forma requerida, luego es retirado del molde. (Madsen, 2011)

En la actualidad se han desarrollado tecnologías que permiten el procesamiento de los CPM, sin embargo existe una discrepancia entre los fabricantes sobre la mejor configuración de sus máquinas, debido a que algunas requieren condiciones específicas de la madera como por ejemplo madera humedad o seca, algunas permiten el ingreso de los constituyentes ya mezclados y otras máquinas ingresan la materia prima por separado. De esta forma podemos concluir que cada proceso considera sus propios parámetros de fabricación para obtener mejores características térmicas y mecánicas del material compuesto. (Markovich N. 2002)

A continuación se describen los procesos más empleados en la fabricación de materiales compuestos.

1.7.1. Extrusión

Este proceso es muy importante para la fabricación de materiales compuestos.

El proceso de extrusión hace referencia a cualquier operación de transformación en la que un material fundido es forzado a atravesar una boquilla para producir un artículo de sección transversal constante y, en principio, longitud indefinida. Además de los plásticos, muchos otros materiales se procesan mediante extrusión, como los metales, cerámicas materiales compuestos, etc., obteniéndose productos muy variados como son marcos de ventanas de aluminio o PVC, tuberías, marcos de madera, etc. (Dai, D. 2014)

Aproximadamente el 80% de los materiales compuestos son fabricados por el método de extrusión y el cual utiliza polvo de madera con un tamaño de partícula equivalente a la malla de 105 micrones, además las matrices termoplásticas que se usan más son el polietileno, polipropileno, poliestireno, policloruro de vinil debido a que a altas temperaturas no se degradan ni pierden la coloración, sin embargo se debe tener en cuenta la gradiente de degradación para evitar esto suceda con la madera. (R J Crawford. 2004)

Principalmente se fabrican perfiles como se observa en la figura 1.4 debido a que tienen propiedades adecuadas para la fabricación de marcos, muebles, etc.

Como resultado se obtienen piezas con una mejor resistencia a la tracción, rigidez, tenacidad, debido a la buena distribución de fibras y a la adecuada orientación, sin embargo se pueden detectar vacíos en la interfaz plástico-madera. (Matuana, L. 2015)

La figura 1.3 muestra, como ejemplo, una representación esquemática de una extrusora típica de husillo único.

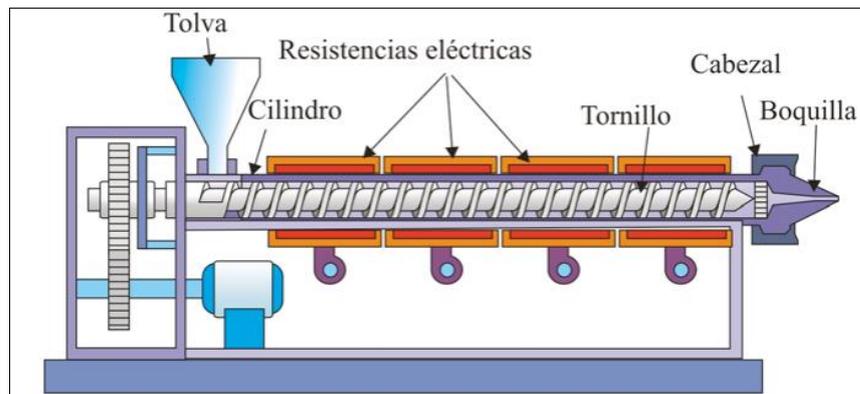


Figura 1.3. Representación de moldeo por extrusión (Hensen, F. 1997)



Figura 1.4. Perfiles fabricados de CPM mediante extrusión (Spears, 2015)

1.7.2. Inyección

El moldeo por inyección se ha considerado para los artículos de WPC desde los primeros estudios. Años atrás el Laboratorio de Investigación de Productos Forestales produjo pellets de WPC para su distribución a los fabricantes de plástico en un proyecto de desarrollo en 1994-1996. Desde aquella época este proceso es usado con algunos productos poliméricos de geometría complicada y con tolerancias aceptables. Este proceso depende también de la temperatura de proceso y del tipo de refuerzo, sean partículas o fibras. (Arthur N. 1998)

En este proceso se utilizan pellets de WPC preparados por extrusión, los cuales son de matrices poliméricas y con una adecuada viscosidad. (Morton, D. 1991)

Para los materiales de WPC, se produjeron componentes en los que se podía tolerar una pared gruesa fácilmente, por ejemplo, las macetas que contienen fibra de madera o bambú pueden tener un espesor de pared ligeramente mayor que una maceta de PP puro, pero sin ninguna consecuencia negativa. Otros artículos moldeados por inyección se pueden observar en la figura 1.6 y requieren una pared relativamente delgada, por ejemplo, si el producto está diseñado para propósitos ligeros, o debido a la forma de producto tradicional, o simplemente la culminación de un diseño eficiente para minimizar los costos de material. (Dominic R. 1997)

La penetración del mercado del moldeo por inyección por parte de los WPC ha sido relativamente pequeña, aunque la inversión en investigación está comenzando a mostrar molduras de alta calidad con el potencial de un diseño elegante como una alternativa competitiva para el polímero. La mayor parte del desarrollo en el moldeo por inyección ha utilizado fibras bien despulpadas, o fibras naturales picadas. (Crawford, R. 1998)

Las aplicaciones de moldeo por inyección utilizan predominantemente polipropileno (el 93% de uso en WPC), con solo una pequeña porción de molduras de inyección a base de polietileno, y 6% de biopolímero. (Spears, 2015)

El esquema de moldeo por inyección se observa en la figura 1.5 la cual muestra las principales partes de la máquina.

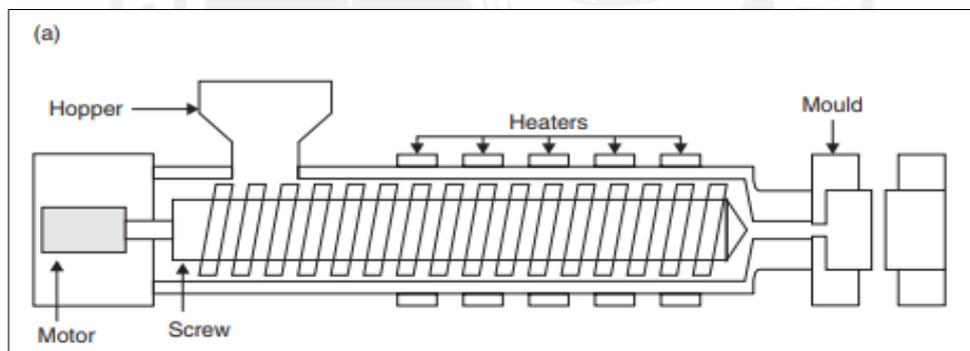


Figura 1.5. Esquema de Moldeo por inyección (Dai, d. 2014)



Figura 1.6. Productos moldeados por inyección. (Dai, D. 2014)

1.7.3. Moldeo por compresión

El moldeo por compresión es un método muy utilizado para la elaboración de materiales compuestos plástico-madera, consiste en colocar el material en un molde precalentado para luego llevarlo a un horno para que se produzca el sinterizado a una temperatura y tiempo determinado, y luego es llevado a la prensa y al cabo de un tiempo determinado es desmoldado para obtener la pieza deseada. Podemos observar la **figura 1.7**.

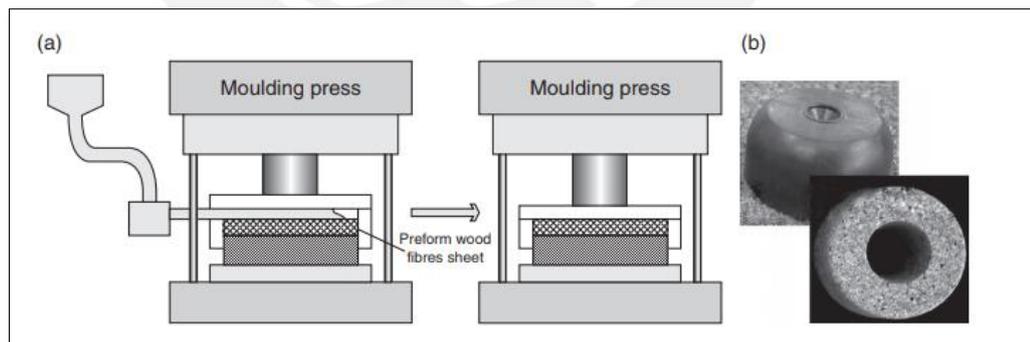


Figura 1.7. a) Sistema de moldeo por compresión. b) producto moldeado por compresión (Dai, D.2014)

El método de moldeo por compresión es adecuado para la producción de perfiles con cualquier material compuesto termoplástico y termoestable. Las propiedades mecánicas y la estabilidad dimensional de los materiales compuestos moldeados por compresión se ven influidas por el diseño de la cavidad del molde, la ubicación

de la carga y los parámetros de procesamiento, p. temperatura, velocidad de enfriamiento o calentamiento del molde, velocidades de cierre y carga de carga. (Tim A.1998)

Según Zampaloni (2007) se utilizó el moldeo por compresión para producir materiales compuestos de kenaf-PP con un nivel razonable de alineación, mediante la selección cuidadosa de regiones bien alineadas dentro de las láminas comprimidas para la prueba. Sus valores se compararon bien con los valores de la literatura para el rendimiento de compuestos de cáñamo, lino, sisal y bonote de procesos unidireccionales equivalentes, y mostraron que tanto la resistencia a la tracción como a la flexión del compuesto de kenaf eran competitivas.

1.7.4. Parámetros que influyen en la fabricación de los materiales CPM

Existen diferentes parámetros que se consideran importantes durante el proceso de fabricación de los materiales compuestos.

a. Estructura y composición química de la madera:

Las células principales de la madera corren axialmente hacia arriba y hacia abajo del árbol, ésta es la dirección en la que la fuerza es mayor. La madera está dividida radialmente por los anillos de crecimiento de los cuales difieren en densidad debido al rápido crecimiento en la primavera y el verano, y el crecimiento lento en el otoño y el invierno.

La composición aproximada de las paredes celulares de las fibras de la madera se pueden observar en la tabla 1.5

Tabla 1.5. Componentes de las fibras de madera. (Ashby, M. 2013)

Celulosa	45%
Hemicelulosa	20%
Lignina	20%
Extractivos	5%

Estos componentes varían de acuerdo a la especie de la madera y por ende las propiedades también varían de acuerdo a su especie. (Ashby, M. 2013)

La madera capirona, es una madera dura que posee una buena estabilidad térmica que las maderas blandas, lo cual es el resultado de la variación de sus componentes. (Olakanmi, E. 2016)

Según Stark (1997) se debe considerar la humedad y la granulometría, debido a que genera variaciones en el proceso de elaboración de piezas de materiales compuestos, lo que se observa en el material son manchas y defectos en la

superficie. Por otro lado el tamaño de partícula influye en las propiedades de resistencia en los materiales compuestos debido a su geometría y tamaño.

b. Temperatura de trabajo

La temperatura de trabajo es un factor muy importante para la fabricación de los materiales compuestos, esta debe permanecer por debajo de la temperatura de degradación de la madera, en el caso de la capirona la temperatura de degradación varía entre los 200-220°C por su poca resistencia al calor. (Youngquist, J. 1996)

Según Frollini (2000), la sobreexposición de la madera encima del rango de temperatura mencionado provoca despigmentación de la madera, liberación de gases, cambio de apariencia en el color, etc.

1.8. Sinterizado de los polímeros

El proceso de sinterizado de polímeros se define como la formación de una masa fundida homogénea a partir de la coalescencia de partículas (JS.LIU 1998).

Este proceso considera dos etapas principales las cuales son, la unión de partículas (coalescencia) y la eliminación de burbujas. (M. Kontopoulou, 1999)

La reducción del área superficial (tensión superficial) es la fuerza motriz para la sinterización. La viscosidad del polímero en estado fundido juega un papel importante ya que las fuerzas viscosas deben superarse para permitir la coalescencia. (C. T. Bellehumeur, 1996)

Sin embargo la sinterización en estado sólido no es posible para polímeros, mientras que la coalescencia de partículas comienza solo cuando se logran ciertas condiciones de movilidad en estado fundido (Greco 2003).

Un factor importante es la temperatura de fusión de cada polímero, la cual está dada por el espesor laminar de cada pieza. (E. Hellmuth, 1965)

Se puede observar en la figura 1.8 como se da el proceso de sinterización de partículas de polímero de PS y PMMA a una temperatura determinada.

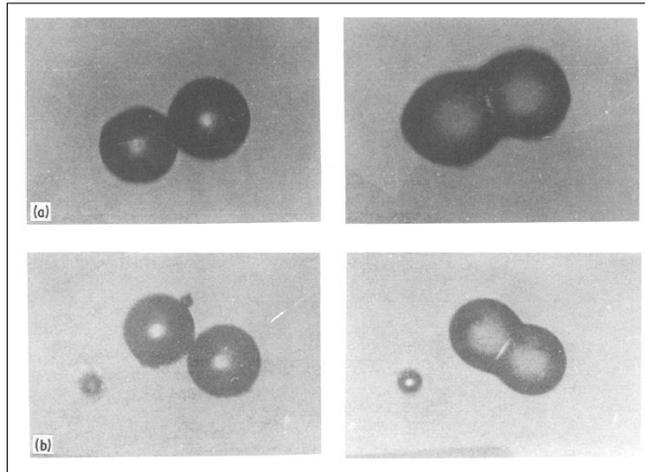


Figura 1.8. Microfotografías ópticas de partículas de polímero antes y durante la sinterización a 200°C. a) PS. b) PMMA (Siegman, A. 1986)

1.8.1. Etapas del sinterizado

En el proceso de sinterizado de materiales compuestos se puede encontrar 3 etapas consecutivas pero que no son fácilmente diferenciables, en las cuales el polímero se aglomera se crean y crecen los cuellos, se densifican y crecen los granos y por último se cierran los poros.

a. Etapa de crecimiento de cuellos.

Según Frenkel (1945), las partículas de polímero amorfo que se ponen en contacto entre sí a una temperatura superior a su transición vítrea tienden a disminuir su superficie total por coalescencia. La tensión superficial es la principal fuerza impulsora en el proceso de coalescencia. Este modelo predice el progreso de sinterización con el tiempo de dos esferas idénticas de radio a que se observan en la figura 1.9, teniendo en cuenta la tensión superficial y la viscosidad newtoniana.

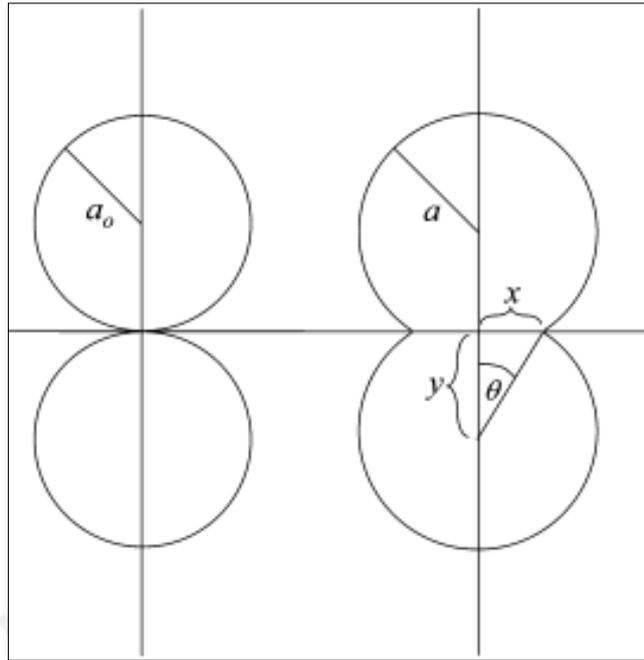


Figura 1.9. Las variables iniciales de cada partícula, donde “ a_0 ” es el radio, “ x ” es el radio del cuello, “ y ” es la distancia del cuello al centro de la partícula y θ es el ángulo de coalescencia.

Las tasas típicas de cizallamiento de sinterización son muy bajas y el cambio de energía potencial (dos partículas) es pequeño en comparación con el cambio de energía de la superficie. Estos resultados conducen a la conclusión de que el mecanismo de sinterización por coalescencia de los polímeros amorfos por encima de su temperatura de transición vítrea es esencialmente un mecanismo de flujo viscoso newtoniano donde la tensión superficial es la principal fuerza motriz. (Rosenzweig, N. 1981)

b. Etapa de densificación y crecimiento de grano

A medida que aumenta el tiempo, el crecimiento de cuellos se va dando y a cuando esto sucede, las partículas empiezan a perder su identidad, se empieza a formar los poros y los granos van aumentando su tamaño. Cuando la densidad aumenta por encima de 90%, los poros van desapareciendo y va llegando la última etapa de la sinterización. Se observa en la figura 1.10 como se da ésta etapa conforme avanza el tiempo.

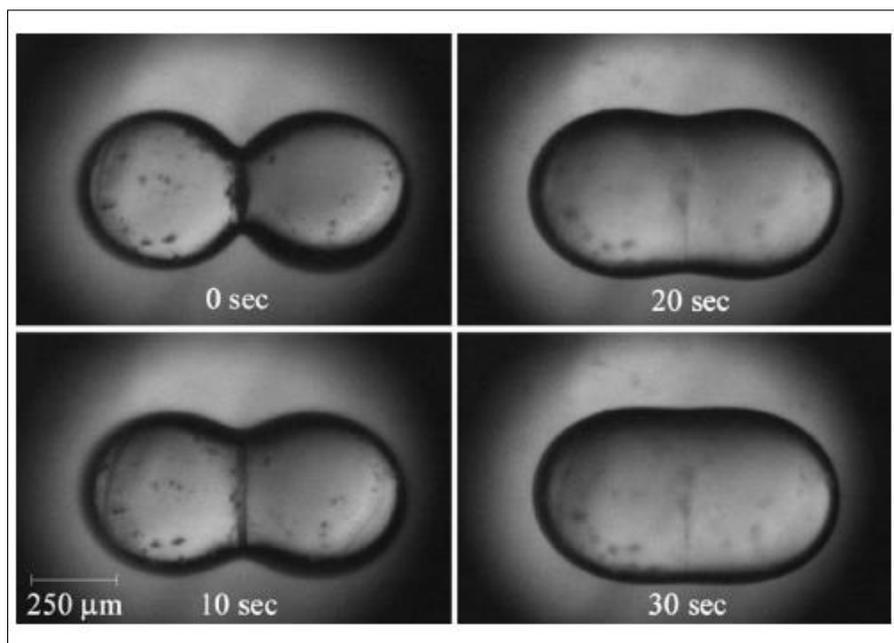


Figura 1.10. Microfotografía óptica de coalescencia de partículas de polipropileno (Scribber, E. 2005)

c. Etapa final de sinterizado.

En esta etapa los poros y vacíos se van eliminando, la densificación se hace muy lenta y se obtienen poros residuales en los bordes de grano y se va dando el crecimiento de grano luego de formarse un todo como unión de las partículas. (Scribber, E. 2005)

1.8.2. Estudio del sinterizado en la elaboración de CPM

Según Beltrán (2012) se pueden distinguir durante el ciclo de moldeo diferentes etapas como se muestra en la **Figura 1.11**.

La curva H representa la temperatura del ambiente que rodea al molde, la curva X representa la temperatura del molde y la curva Y representa la temperatura del interior del molde.

Además se observa 6 etapas en la curva Y, es decir muestra el comportamiento de los materiales dentro del molde:

1. Inducción de los componentes dentro del horno, se agregan los componentes dentro del molde precalentado y se ingresan al horno a una temperatura específica.
2. Sinterización: en el tramo desde A hasta B de la gráfica, el polímero comienza fundirse poco a poco.

3. Densificación: ocurre en tramo desde B hasta C, en el cual la temperatura llega al valor deseado y se encuentra por un tiempo determinado y por esta razón todo el polímero ya se encuentra fundido.
4. Enfriamiento Inicial: debido al calor del ambiente que rodea al molde, la temperatura del mismo sigue aumentando.
5. Cristalización: debido al cambio de geometría de polímero cristalino a polímero amorfo, dicho polímero sufre una variación de su densidad debido a que su volumen disminuye.
6. Enfriamiento final

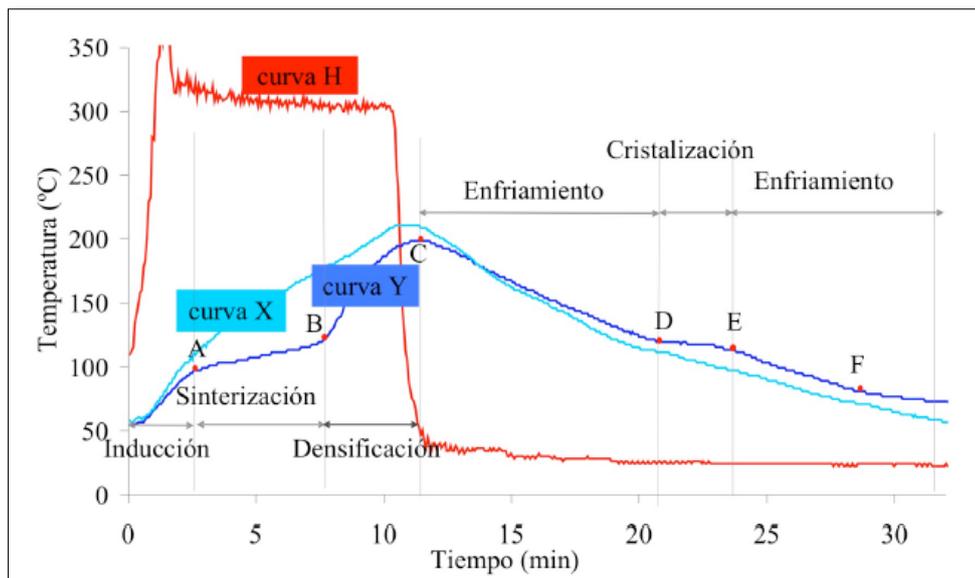


Figura 1.11. Variación de la temperatura del aire que rodea al molde (curva H), temperatura del molde (curva X) y temperatura del interior del molde (curva Y) durante el moldeo (Beltrán, 2012)

1.8.3. Métodos de análisis del sinterizado

Algunas investigaciones han coincidido con el uso de la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) para examinar la morfología de la superficie, la coalescencia de los polímeros y los tipos de fracturas originados por ensayos mecánicos realizados para la medición de propiedades mecánicas. Por otro lado también estudios han revelado que la adhesión entre las partículas afecta la resistencia y la rigidez del material compuesto, teniendo en cuenta lo expuesto, se recomienda el uso de la Espectroscopia Infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) dado que esta técnica cuantifica la capacidad de adherencia entre materiales. (Zhang, 2009).

Además para medir las propiedades mecánicas de los materiales compuestos, se puede realizar ensayos de flexión, tracción, impacto de los materiales y hacer comparaciones con los constituyentes por separado, de tal forma podemos verificar si las propiedades mejoran o no.

1.9. Aplicaciones de los materiales compuestos de plástico y madera.

Las propiedades estéticas y de bajo mantenimiento de los materiales compuestos de madera y plástico continúan impulsando el crecimiento en aplicaciones de reemplazo de madera. Los volúmenes están creciendo, tanto en Norteamérica donde el mercado está bien establecido, pero ahora también en Europa, donde ahora está comenzando a afianzarse.

Casi el 85% del mercado de WPC se encuentra en Norteamérica, principalmente debido al éxito en la creación de aplicaciones de productos. En América del Norte, el mercado de WPC continuará experimentando un crecimiento de dos dígitos de 2003 a 2010. El mercado de plataformas fue el motor original para el crecimiento de WPC, y continúa representando casi el 65% del mercado WPC. (Markarian, J. 2005)

En general los materiales compuestos de plástico están revolucionando la industria debido a que el producto final tiene propiedades mejoradas en lo que respecta a rigidez, comportamiento térmico. Además el bajo costo y la protección contra la corrosión ambiental son factores que incentivan a su fabricación mediante diferentes métodos, sea inyección, extrusión, moldeo por compresión, moldeo rotacional, entre otros.

En las figuras 1.12 hasta la 1.15 podemos observar los diferentes productos que se pueden realizar con materiales compuestos.

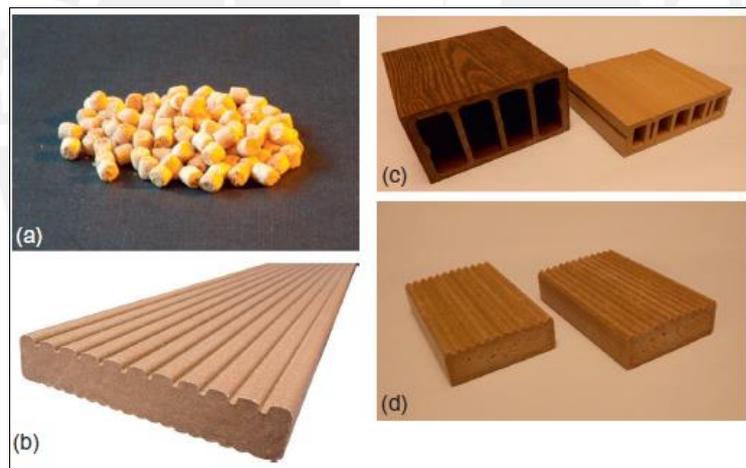


Figura 1.12. a) 80% de pellets de polipropileno y polvo de madera (b) planchas de plataforma de perfil sólido (c) dos perfiles huecos con diferentes texturas de grano de madera (d) núcleo de menor densidad en un perfil de espuma extruido. (Spears, M.2015)



Figura 1.13. Tableros de cubierta de wood plastic composites de diferentes formas (Gardner, D. 2015)



Figura 1.14. Diferentes piezas de autos, sillas, tableros. (Gardner, D. 2015)

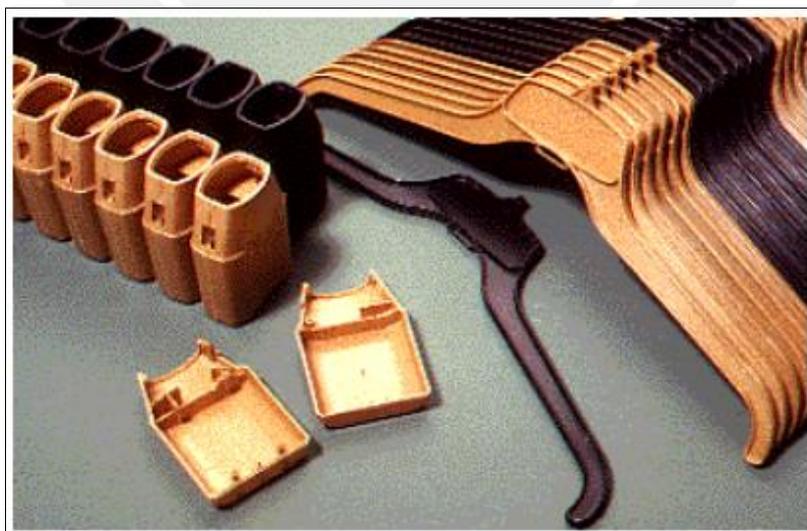


Figura 1.15. El uso de lignocelulósicos como rellenos de refuerzo permite que los termoplásticos se moldeen en una amplia variedad de formas. (Youngquist, J.1996)

De acuerdo a las diferentes aplicaciones encontradas se tiene lo siguiente:

- **En exteriores:**
 - ✓ Aplicaciones en perfiles para construcción, carpinterías, paneles.
- **En Interiores:**
 - ✓ En el área de ingeniería automotriz, partes internas, externas de vehículos de alta gama.
 - ✓ Marcos de puertas, ventanas, perfiles.
 - ✓ También se encuentran aplicaciones en la elaboración de juguetes, electrodomésticos, instrumentos musicales.



CAPITULO II

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

En este capítulo se describe el diseño experimental, que consiste en la determinación de los parámetros de proceso de sinterizado involucrados en la fabricación de materiales compuestos a partir de polietileno reciclado y madera capirona recuperada mediante moldeo por compresión. Para ellos primero se realizará la caracterización de la materia prima involucrada (madera y plástico) según las normas ASTM. Luego se realizarán pruebas de moldeo por compresión de muestras planas rectangulares para determinar la temperatura y el tiempo de sinterizado. Posteriormente, se realizará variaciones en el tamaño de partícula de madera y el porcentaje de volumen plástico-madera y se harán muestras con el tiempo y temperatura de sinterizado obtenidos con las mejores propiedades. Finalmente se realizará los ensayos de flexión, densidad, absorción de agua y la caracterización del material compuesto con mejores propiedades obtenidas.

2.1. Materiales

2.1.1. Partículas de madera capirona.

Se ha elegido partículas de madera capirona como se observa en la figura 2.1, las cuales fueron obtenidos en la zona industrial maderera de Lima. (Villa el Salvador) y se clasificaron según el tamaño haciéndolos pasar por tamices designados de acuerdo a la norma ASTM E11-15.



Figura 2.1. Partículas de madera capirona

Se debe tener en cuenta que las partículas de madera capirona no ha sido tratada, los resultados de su caracterización se presentan a continuación:

Tabla 2.1 Características de la madera capirona (Sierra, S. 2012)

COMPONENTE	%(g/g)
Lignina Klason	22.41
Contenido de humedad	14.06
Componentes acuosos (extraídos con agua caliente)	6.09
Componentes acuosos(extraídos con agua fría)	3.55
Cenizas	2.11
Componentes Orgánicos	1.52
Componentes grasos	1.03
Propiedades mecánicas	(MPa)
Resistencia a la flexión(fibra transversal)	7.6
Módulo elástico en flexión (fibra transversal)	1259
Resistencia a la flexión (fibra longitudinal)	128
Modulo elástico en flexión (fibra longitudinal)	13526

2.1.2. Partículas de plástico

Para la investigación se usó polietileno picado proveniente de tapas roscas plásticas de color blanco que se adquirieron de la empresa CLOSURE SYSTEMS INTERNATIONAL ALUSUD PERU S.A., como una simulación de reciclaje. A continuación se puede observar en la Figura 2.2 y 2.3, el material utilizado.



Figura 2.2. Tapas roscas de polietileno



Figura 2.3. Polietileno Picado

2.2. ETAPA 1: Caracterización de los materiales

2.2.1. Caracterización de la madera capirona

I. Equipos e instrumentos empleados

a. Tamices

En la figura 2.4 se puede observar los tamices formados por mallas de acero inoxidable normalizados que se utilizaron para poder clasificar la madera en diferentes tamaños de partículas, cuyas medidas en cada malla se presentan en la **tabla 2.2**.



a)



b)

Figura 2.4. a) Clasificación de tamices. b) Tamiz MR2

Tabla 2.2. Características de las mallas utilizadas en el tamizado de la madera capirona de acuerdo a la norma ASTM E11-15.

Malla	Malla Normalizada	Tamaño de partícula (mm)
MR1	MESH´ 3 1/2	≤ 5.15
MR2	MESH´ 6	≤ 3.33
MR3	MESH´ 10	≤ 1.90
MR4	MESH´ 18	≤ 0.98
MR5	MESH´ 35	≤ 0.48

Notación MRX=tamaño de partícula de madera.

b. Balanza analítica

El tipo de balanza que se utilizó para el pesaje de muestras de fue la METTLER TOLEDO modelo New Classic ML con una precisión de 0.0001g y con un máximo de 220g que se observa en la figura 2.5.

También se utilizó la balanza para realizar los ensayos de densidad con sus respectivos accesorios, tales como vaso precipitado, soporte para el recipiente de inmersión, alambre con canastilla, lastre de acero inoxidable con un sujetador.

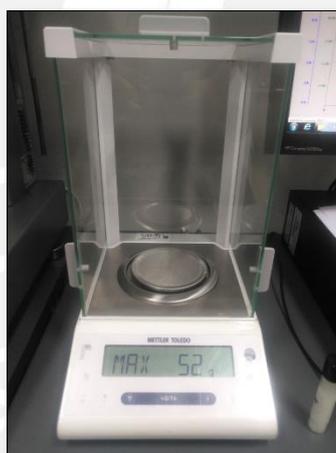


Figura 2.5. Balanza Analítica

c. Otros materiales empleados

- Agua destilada para el ensayo de densidad y absorción de agua
- Recipiente de plástico para contener las muestras sumergidas en agua.
- Lastre: peso extra para evitar que el material compuesto flote durante el ensayo de absorción de agua.

II. Determinación de la densidad de la madera

Este ensayo se realiza bajo la condiciones de la norma ASTM D235-13: METODO B. Se selecciona 5 muestras de madera capirona sin ángulos rectos, se secan en un vaso precipitado a 103°C por 24 horas, luego se realiza el pesado en seco en la balanza analítica con sus accesorios (M_{Ma}), seguido de esto se pesa la madera

con el lastre para que no flote y toma el peso (M_{Ms}). Finalmente se pesa el lastre sumergido. (M_L)

El valor de la densidad de la madera capirona se calcula de la siguiente manera:

$$\rho_{MC} = \frac{M_{Ma}}{M_{Ma} + M_L + M_{Ms}} \times \rho_{H_2O} \quad (2.1)$$

Donde:

M_{Ms} = Masa aparente de la madera más el lastre sumergidos totalmente en agua

M_L =Masa aparente del lastre sumergido totalmente en agua

M_{Ma} =Masa aparente de la madera seca sin el lastre.

ρ_{H_2O} = Densidad del agua a la temperatura de ensayo

III. Ensayo de absorción de agua de la madera

Este ensayo se realiza bajo las condiciones de la norma ASTM D 1037-06a- Método de ensayo B. Se selecciona 5 muestras de madera capirona, se secan en un vaso precipitado a 103°C por 24 horas, luego se realiza el pesado en seco en la balanza analítica con sus accesorios (W_{Ms}), seguido de esto se sumerge las maderas en agua destilada a una profundidad de 25 mm, se coloca un peso encima para que la madera no flote. Luego de 24 horas se pesa la madera W_{Ma} . El porcentaje de absorción de agua de la madera se calcula de la siguiente manera:

$$A_{MC}(\%) = \frac{W_{Ma} - W_{Ms}}{W_{Ms}} \times \rho_{H_2O} \quad (2.2)$$

2.2.2. Caracterización del polietileno

I. Equipos empleados

a. Equipo de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR-ATR)

El análisis de FTIR se lleva a cabo en un espectrómetro de infrarrojo por transformada de Fourier de tensor 27 de la marca Bruker, que cuenta con el accesorio de atenuación total de reflectancia. (ATR Platinum), se puede observar el equipo en la figura 2.6.



Figura 2.6. Equipo de FTIR-ATR

b. Equipo de índice de fluidez

El medidor de índice de Fluidez Zwick/Roell Cflow (figura 2.7), permite el control rápido del índice de fluidez en masa (IFM) del polímero. El diseño del equipo facilita una buena distribución de la temperatura en el canal de ensayo, y con sus accesorios respectivos es posible realizar su limpieza.



Figura 2.7. Equipo de Índice de Fluidez

c. Equipo de calorimetría diferencial (DSC)

El calorímetro diferencial de Júpiter STA 449 F3-Netzsch el cual se observa en la figura 2.8, trabaja con atmosferas inertes controladas en un rango de temperaturas entre 150°C y 2400°C.



Figura 2.8. Equipo de DSC

II. Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR-ATR)

El objetivo de este ensayo es verificar si el material con el que se trabaja es el polietileno de alta densidad. Esto se realiza mediante el análisis de los grupos funcionales que están presentes en el polímero. Para empezar se realiza la limpieza de la maquina junto al accesorio de atenuación de reflectancia de diamante y se coloca la muestra del material a analizar. Los parámetros de ensayo son tomamos en referencia al material que se desea analizar. Luego mediante el software que utiliza la maquina se puede observar el espectro obtenido y se hace comparación con la memoria de la máquina para determinar el material.



Figura 2.9. Proceso de ensayo de FTIR-ATR del polietileno

III. Índice de Fluidéz (IFM)

El índice de fluidéz del plástico se determina utilizando la norma ASTM D1238-13 (procedimiento B). En la norma figuran las condiciones de ensayo para cada tipo de polímero, para el caso del polietileno la temperatura de ensayo es de $190^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, y la carga es de 2.16 kg. Para empezar el ensayo debemos verificar que el equipo este limpio, libre de impurezas de ensayos anteriores, luego calentamos el equipo hasta la temperatura de ensayo y se pesa de 3 a 5 g de material (según norma). Cuando el equipo alcance la temperatura de ensayo, se ingresan las partículas de polietileno en el cilindro de calentamiento y estas partículas deben calentarse por 180 segundos. Transcurrido el tiempo el material es forzado a pasar por el agujero de un dado por efecto de la carga aplicada sobre el fluido. Posteriormente cada 60 segundos se extruye una cierta cantidad de masa cuya longitud varía entre los 5 a 7cm. Finalmente se pesa la masa extruida y se obtiene el índice de fluidéz al dividir ambos valores (masa y tiempo)

IV. Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

Este ensayo tiene como objetivo hallar la temperatura de fusión, la temperatura de transición vítrea, entre otros. Este ensayo se realiza de acuerdo a la norma ASTM D3418-12. Se debe preparar la muestra de polietileno para darle forma circular para luego colocar 5-8 mg de muestra en el equipo. Luego se configura el equipo con los parámetros de dos calentamientos y un enfriamiento, tal como se observa en la tabla 2.3., y se utiliza una velocidad de calentamiento y enfriamiento de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$. El gas de purga es nitrógeno a un flujo de 50 mL/min.

I. **Tabla 2.3.** Parámetros de ensayo para el equipo de Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

Pasos	Temperatura (°C)
Primer calentamiento	25-600
Primer enfriamiento	600-25
Segundo calentamiento	25-600

II. **Análisis Termo gravimétrico (TGA)**

El análisis Termo gravimétrico del Polietileno se realiza según la norma ASTM E1131-08 (2014).

Para este ensayo se pesa 10-20 mg de muestra y se trabaja con un rango de temperaturas de 25-600°C, a una velocidad de 10°C/min.

TGA mide la pérdida de peso (degradación) en función de la temperatura a una atmosfera controlada (usualmente nitrógeno).

La atmosfera inerte es de nitrógeno con un flujo de 50 mL/ min.

2.3. Diseño experimental

Parte experimental I

Tiene como finalidad determinar los parámetros del proceso de sinterizado, los cuales son el tiempo y temperatura de sinterizado, del material compuesto que será fabricado con polietileno y madera capirona.

El tamaño de partícula de la madera (≤ 3.33 mm) se mantendrá constante para muestras de una misma proporción en volumen de plástico y madera (70 % y 30% respectivamente) y así variar la temperatura de trabajo y el tiempo de permanencia en el horno a dicha temperatura.

La temperatura de trabajo debe evaluarse por encima de la temperatura de fusión del plástico (T° fusión=135°C). Sin embargo la temperatura de trabajo no debe de estar por encima de la temperatura de degradación de la madera (aproximadamente 220°C) debido a que puede afectar en las propiedades del material compuesto.

Según la norma ISO 17025, el número mínimo de repeticiones en una investigación es de 3 muestras, por consiguiente para esta primera parte se ha considerado trabajar 3 muestras de material compuesto para una misma temperatura, tiempo y proporción de partículas. Por cada muestra se obtendrá 2 probetas para llevar a cabo el ensayo de flexión con un total de 6 muestras para analizar por cada variante. En total se realizaron 57 muestras de material compuesto y 114 probetas para ensayos de flexión.

Con los resultados obtenidos se podrá encontrar los parámetros ideales (temperatura y tiempo de sinterizado) para el material compuesto a realizar.

En la tabla 2.4 se muestra la distribución de la cantidad de muestras que se realizó en esta investigación.

Tabla 2.4. Cantidad de muestras a realizar en la parte experimental N°1

TEMPERATURA	TIEMPO EN EL HORNO	CANTIDAD DE MUESTRAS
T1 =145°C	40	3
	50	3
	60	3
	70	3
T2=155°C	40	3
	50	3
	60	3
	70	3
T3=165°C	35	3
	40	3
	50	3
	60	3
	70	3
T4=175°C	35	3
	40	3
	50	3
	60	3
	70	3
T5=185°C	35	3

Parte experimental II

En esta parte del estudio se utilizarán la temperatura y tiempo de sinterizado óptimos, encontrados en la primera parte y se variará el tamaño de partículas de madera capirona y la proporción en volumen plástico-madera.

Para poder comparar resultados de las propiedades mecánicas del material compuesto se realizarán 3 muestras, considerando 3 diferentes porcentajes de constituyentes del material compuesto y 3 tamaños de partículas, y también se fabricará 3 muestras de polietileno puro. En la tabla 2.5 se muestra la distribución de muestras que se realizó en esta etapa.

Tabla 2.5. Cantidad de muestras a realizar en la parte experimental N°2

	% PLASTICO - MADERA	MR1	MR2	MR3
Ts° y ts óptimo	100-0%	p1, p2, p3		
	70 -30 %	m1	m4	m7
		m2	m5	m8
		m3	m6	m9
	60-40%	m10	m13	m16
		m11	m14	m17
		m12	m15	m18
	50-50%	m19	m22	m25
		m20	m23	m26
		m21	m24	m27

2.4. ETAPA 2: Fabricación de muestras de la parte experimental I y II

2.4.1. Fabricación de muestras a partir de polietileno picado y partículas de madera capirona.

I. Equipos

a. Horno Eléctrico:

En la figura 2.10.a. se observa el horno utilizado que cuenta con un sistema de calentamiento que contiene 6 resistencias ubicadas en las paredes laterales, ver figura 2.10.b En la parte posterior cuenta con un sistema de ventilación, el cual distribuye el calor en todo el horno de manera homogénea.



a)



b)

Figura 2.10. a) Horno Eléctrico exterior. b) Resistencias del horno.

b. Prensa Hidráulica:

La prensa hidráulica (ver figura 2.11) cuenta con un pistón que ejerce fuerza sobre el vástago y este a su vez ejerce presión sobre el molde donde se encuentra el material compuesto fabricado. La presión con la que se trabaja es de 70 bares.



Figura 2.11. Prensa hidráulica.

c. Molde

Se utilizó un molde fabricado de alumod del cual se obtienen muestras de 300x150 mm. El diseño del molde permitía conectar el molde con una termocupla, la cual era el sensor que medía la temperatura del molde dentro del horno, se puede observar el molde utilizado en la figura 2.12.



Figura 2.12. Molde de alumod

d. Sistema de extracción

Con el sistema de extracción sirve para soportar la presión durante el prensado de la muestra, también retira la tapa y muestra del molde mediante pines extractores. (Ver figura 2.13)



Figura 2.13. Sistema de extracción

e. Sistema de transporte.

En la figura 2.14 se observa el sistema con el cual se transporta el molde con tapa al horno para su calentamiento, también soporta la presión de la prensa.



Figura 2.14. Sistema de transporte

f. Otros Insumos.

Desmoldante: utilizado para que la muestra no quede atrapada en el molde. Soporta temperaturas hasta 260°C, ver figura 2.15.

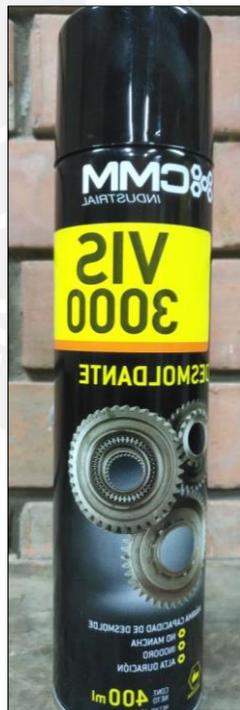


Figura 2.15. Desmoldante

II. Determinación de la cantidad de partículas de madera capirona y de polietileno:

Se calcula mediante las ecuaciones:

$$M_{MC} = V_{TM} \times \frac{\%V_{MC}}{100} \times \rho_{MC} \quad (2.3)$$

$$M_{PE} = V_{TM} \times \frac{\%V_{PE}}{100} \times \rho_{PE} \quad (2.4)$$

$$M_t = M_{MC} + M_{PE} \quad (2.5)$$

M_{MC} = masa de la madera capirona para una muestra (g)

V_{TM} = volumen total de una muestra a fabricar (cm^3)

$\%V_{MC}$ = fracción de volumen de las partículas de madera capirona (%)

ρ_{MC} = densidad de la madera capirona

M_{PE} = masa de polietileno para una muestra (g)

$\%V_{PE}$ = fracción de volumen de las partículas de polietileno (%)

ρ_{PE} = densidad del polietileno

M_t = masa total de la muestra de polietileno y madera capirona

Cabe mencionar que el tamaño de muestra es de 300x150x11mm por tanto el volumen de la muestra es 495 cm^3

Tabla 2.6. Cantidad de plástico y madera de acuerdo a los porcentajes en volumen

$\%V_{PE}$	$\%V_{MC}$	$V_{tm}(cm^3)$	DENSIDAD PE	DENSIDAD MC	M_{PE} (g)	M_{MC} (g)
100	0	495	0.96	0	475.2	0
70	30	495	0.96	0.736	332.6	109.3
60	40	495	0.96	0.736	285.1	145.7
50	50	495	0.96	0.736	237.6	182.2

III. Mezclado de las partículas de madera capirona y polietileno

Las partículas de madera y plástico se mezclan en un recipiente y se procede a mezclar por dos minutos para obtener una mezcla homogénea.

En la figura 2.16 se observa el material mezclado listo para ingresar al horno.



Figura 2.16. Mezcla Homogénea del plástico-madera

IV. Aplicación del Desmoldante

Se adiciona el desmoldante con la finalidad que cuando la muestra sea extraída no se adhiera a las paredes del molde dificultando la extracción, ver figura 2.17.



Figura 2.17. Aplicación del desmoldante

V. Pre calentamiento del molde

El molde es pre calentado hasta una temperatura superior a la temperatura de trabajo para que luego cuando entre al horno con la carga, no demore mucho tiempo en regresar a la temperatura de trabajo, observar figura 2.18.



Figura 2.18. Pre calentamiento del molde

VI. Carga de la muestra y calentamiento a la temperatura de trabajo

Luego de que el molde esté pre calentado por encima de la temperatura de trabajo, se saca el molde del horno con ayuda del sistema de transporte para agregar el material mezclado. Posteriormente luego de que se el material está dentro del molde, ver figura 2.19, se lo coloca la tapa y se ingresa el molde al horno, para que se caliente a una temperatura y tiempo determinado.



Figura 2.19. Mezcla dentro del molde



Figura 2.20. Molde precalentando cargado con su tapa antes de ingresar al horno

VII. Prensado y enfriamiento del molde

Luego de que el material dentro del molde ha estado un tiempo determinado a la temperatura de trabajo, se procede a sacar el molde del horno y con el sistema de transporte colocarlo en la prensa. Se centra en los pines de extracción y se procede a realizar el prensado bajo una compresión de 70 bares durante un tiempo de 10 min.(ver figura 2.21) Tener en cuenta que mientras el molde esta siempre prensado durante un tiempo, se está llevando a cabo también el enfriamiento del molde.



Figura 2.21. Prensado del molde

VIII. Extracción de la muestra

Para finalizar el proceso de moldeo por compresión se extrae la muestra del molde con el sistema de extracción y con la prensa hidráulica, ver figura 2.22.



Figura 2.22. Extracción de la muestra

IX. Rotulado de muestras

Cuando la muestra se extrae del molde se retiran los excedentes y luego se deja enfriar para luego ser rotulada con el tiempo y temperatura de trabajo si fuese la primera parte de la investigación, o con el tamaño de partícula y porcentaje de volumen si se tratara de la segunda parte de la investigación.



a)

b)

Figura 2.23. a) Muestra final. b) muestra rotulada primera parte

Las muestras se rotulan de la siguiente manera:

CPM	175°C	40	MR2	70	30	A/B/C	1/2
-----	-------	----	-----	----	----	-------	-----

CPM: Compuesto plástico madera

175°C: Temperatura de trabajo

40: tiempo de trabajo (min)

MR2: Tamaño de partícula

70: Porcentaje de plástico

30: Porcentaje de madera

A/B/C: Replica de muestra

½: parte de cada replica

2.4.2. Fabricación de probetas

La fabricación de probetas se realiza de acuerdo a las normas ASTM que se muestran a continuación:

Tabla 2.7. Ensayos y normas ASTM utilizadas.

Tipo de ensayo	Norma ASTM
Ensayo de Flexión	D 1037-06a
Densidad	D 792-13
Absorción de agua	D 1037-06a

Como ya se había mencionado anteriormente por cada muestra de material compuesto fabricado, se obtienen dos probetas para ensayos de flexión como se observa en la figura 2.24 y por cada probeta de flexión se obtienen dos probetas para los ensayos de densidad y absorción de agua.

Para la fabricación de las probetas para los ensayos primero con la ayuda de un vernier digital se midió el ancho de la muestra y se dividió la muestra en la mitad, posteriormente se utilizó una maquina cortada de madera ubicada en la facultad de Arquitectura para cortar la muestra.

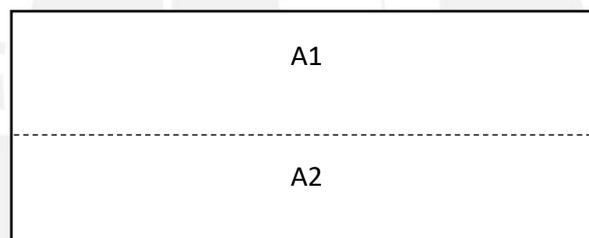


Figura 2.24. Corte de la muestra para obtener 2 probetas de ensayo para flexión

2.5. ETAPA 3: Análisis del material compuesto

2.5.1. Ensayos realizados al material compuesto

a. Máquina de Flexión

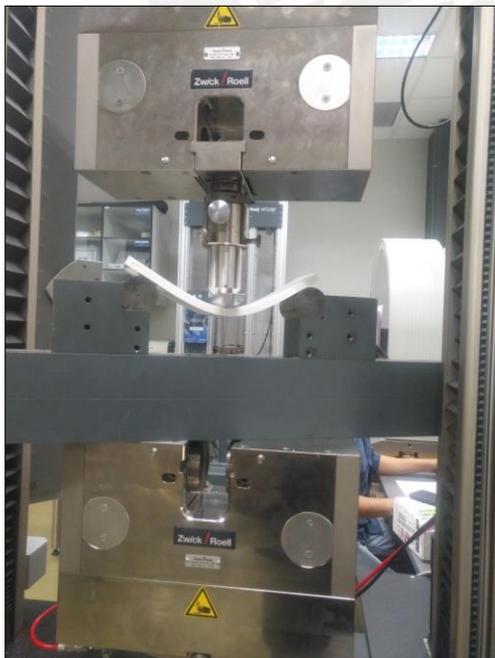
La máquina de ensayo universal Zwick /Roell Z050 posee una carga de 50 kN, y permite realizar ensayos de flexión. La máquina cuenta con el software TestExpert de Zwick, el sistema de uso es sencillo. En la figura 2.25 podemos observar la máquina con la que se realizó el ensayo de flexión.



Figura 2.25. Máquina de Flexión Zwick/ Roell Z050

I. Ensayo de Flexión

El ensayo de flexión se realizó de acuerdo a la norma ASTM D 1037-06a. Primero se debe colocar las piezas adecuadas en la maquina Zwick/Roell Z050, según la norma ASTM. Luego se coloca la probeta en los apoyos que tienen una distancia de separación de 240 mm. La velocidad de ensayo es de 5 mm/ min. Ver figura 2.26



a)



b)

Figura 2.26. a) Flexión de Polietileno puro. b) Flexión de material compuesto

El cálculo utilizado para la obtener la resistencia a la flexión y el módulo elástico obedecen a las siguientes formulas:

$$R_b = \frac{3F_{max}.L}{2bd^2} \quad (2.6)$$

$$E = \frac{L^3}{4bd^2} \times \frac{\Delta F}{\Delta Y} \quad (2.7)$$

Donde:

R_b : Resistencia a la flexión de la probeta (MPa)

E: Modulo elástico en flexión (MPa)

F_{max} : Fuerza máxima obtenida durante el ensayo (N)

L: Longitud entre apoyos (mm)= 240 mm

d: Espesor de la probeta (mm)

b: Ancho de la probeta (mm)

ΔY : Diferencia entre dos puntos del alargamiento en la gráfica obtenida del ensayo de flexión

ΔF : Diferencia entre dos puntos de la fuerza en la gráfica obtenida del ensayo de flexión

II. Ensayo de densidad.

Este ensayo se realizó de acuerdo a la norma ASTM D792-13: Método A para ensayar materiales plásticos en agua. Este método contempla muestras desde 1 a 50 g.

Como ya se había mencionado de las probetas de flexión se obtienen 4 muestras. Para este ensayo usamos la balanza analítica con sus accesorios. Primero determinamos la masa de cada muestra seca en el aire (a), luego se sumerge la muestra con el lastre debido a que sino la muestra flota, se registra su masa (b). También se sumerge el lastre y se anota su masa (w). Ver figura 2.27.

El cálculo de la densidad del material compuesto se calcula mediante la siguiente formula:

$$\rho_{CPM} = \frac{a}{(a + w - b)} \times 0.997 \quad (2.8)$$



Figura 2.27. Peso de la muestra sumergida con el lastre

III. Ensayo de Absorción de agua

El ensayo de absorción de agua del compuesto se realiza de acuerdo a la norma ASTM D1037-06a Método de ensayo B.

Con las mismas muestras utilizadas para medir la densidad del material compuesto se realiza esta prueba de absorción de agua.

Se sumergen las muestras en un recipiente con agua destilada y se colocan las muestras pero con un lastre de acero inoxidable debido a que las piezas flotan. Se dejan las muestras sumergidas por 24 horas. Ver figura 2.28.

El porcentaje de absorción de agua del material compuesto de plástico y madera se calcula de la siguiente forma:

$$A_{CPM} \% = \frac{W_a - W_s}{W_s} \times \rho_{H_2O} \quad (2.9)$$

A_{CPM} (%) = Porcentaje de absorción de agua del material compuesto

W_s = Peso del material compuesto seco (g)

W_a = Peso del material compuesto luego de 24h de inmersión en agua



Figura 2.28. Ensayo de Absorción de agua del material compuesto.

2.5.2. Caracterización del material compuesto de mejores propiedades

I. Equipos empleados:

a. Estereoscopio óptico:

Este equipo permite analizar micrográficamente el material compuesto con una capacidad desde 6.3 hasta 40 aumentos. En la figura 2.29 se puede observar cómo se realizó este análisis.



Figura 2.29. Estereoscopio óptico

CAPITULO III

3. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

En este capítulo se mostraran los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados en la metodología experimental de la investigación, se presentan las gráficas que muestran las tendencias de los ensayos. A su vez se presentaran los parámetros óptimos obtenidos en el proceso de sinterizado de polietileno y madera capirona mediante moldeo por compresión.

3.1. Caracterización de la madera capirona

Según los estudios realizados por Miller (1999), la madera tiene tres componentes principales que son la celulosa, hemicelulosa, lignina y aditivos en cantidades no apreciables.

Según J. G. Rutiaga (2010) en un estudio realizado los componentes químicos de la madera son cenizas, extraíbles (etanol–benceno, agua caliente y agua a temperatura ambiente), lignina y celulosa. La variación de componentes químicos encontrados en las muestras de madera capirona fue de la siguiente manera: cenizas (0.62 a 1.84 %), solubilidad total (10.19 a 33.35 %), lignina (25.24 a 27.24 %) y celulosa (49.24 a 55.25 %).

Por otro lado los valores de la celulosa son aproximadamente 60% y de la hemicelulosa 19 %. (Sibille 2006)

En la siguiente tabla 3.1 se presentan resultados sobre la la caracterización de la madera capirona realizada por SIERRA S. (2012) quien pertenece al grupo de investigación del cual se desarrolla esta tesis.

Tabla 3.1 Características de la madera capirona (Sierra, S. 2012)

COMPONENTE	%(g/g)
Lignina Klason	22.41
Contenido de humedad	14.06
Componentes acuosos (extraídos con agua caliente)	6.09
Componentes acuosos(extraídos con agua fría)	3.55
Cenizas	2.11
Componentes Orgánicos	1.52
Componentes grasos	1.03
Propiedades mecánicas	(MPa)
Resistencia a la flexión(fibra transversal)	7.6
Módulo elástico en flexión (fibra transversal)	1259
Resistencia a la flexión (fibra longitudinal)	128
Modulo elástico en flexión (fibra longitudinal)	13526

Según estos estudios realizados el valor de la lignina es de 22.41%, lo cual se encuentra en el rango de maderas duras, usadas para este tipo de investigaciones, además debido a que la madera tiene como componentes a la celulosa, según Sierra S. (2012) el porcentaje de celulosa es de 55.64%.

3.1.1. Densidad de la madera Capirona

Ya que la densidad es una propiedad física importante como dato para la fabricación del material compuesto, Ananías (1992) describe:

Que la densidad de la madera expresa la relación entre la masa de los distintos tipos de elementos que forman la madera y el volumen que ellos ocupan. Como la madera es un material poroso, debe considerarse al referirse a la densidad de la madera el volumen interno de espacios vacíos existentes. (p.41)

Según CCM (2003):

En la madera, por ser higroscópica, la masa y el volumen varían con el contenido de humedad; por lo que resulta importante expresar la condición bajo la cual se obtiene la densidad. Esta es una de las características físicas más importantes, ya que está directamente relacionada con las propiedades mecánicas y durabilidad de la madera. La densidad varía ampliamente entre diferentes especies y tipos de madera. (p.55)

Se realizó el ensayo teniendo los siguientes resultados que se observan en la tabla 3.2 y en la tabla 3.3 se tiene valores de la densidad de la madera que se obtuvo en diferentes investigaciones.

Tabla 3.2. Densidad de la madera capirona.

Muestra	M _{MA} (g)	M _{MS} (g)	M _L	PMC
1	3.4526	13.2561	14.3711	0.7536
2	3.3811	13.1564	14.3711	0.7334
3	3.1775	13.2516	14.3711	0.7372
4	3.1515	13.2687	14.3711	0.7386
5	3.1812	13.2621	14.3711	0.7392

Por tanto la densidad promedio de la madera capirona es 0.7404 g/cm³

Tabla 3.3. Densidad de la madera capirona en distintas investigaciones

DENSIDAD (g/cm ³)	REFERENCIA
0.74	AMAZONIA VIVA
0.76	SIBILLE 2006
0.76	BALUARTE 2002
0.78	VASQUEZ 2014

3.1.2. Absorción de agua de la madera

Luego de realizar el ensayo, se determinó que la absorción de agua de la madera capirona es 47.0614 % dicho valor se determinó con el promedio de absorción de agua de las 5 muestras que se usaron para el ensayo.

Tabla 3.4. Valores de absorción de agua de la madera capirona

MUESTRA	WMS (g)	WMA(g)	AMC (%)
1	2.8769	4.2612	48.1177
2	3.1386	4.5984	46.5111
3	3.1562	4.7694	51.1121
4	2.9561	4.1912	41.7814
5	3.1619	4.6728	47.7845

3.2. Caracterización del polietileno

3.2.1. Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier

Este ensayo se realizó con la finalidad de comprobar que el material que se está utilizando es el adecuado. Compara el espectro infrarrojo obtenido con el espectro de la base de datos del equipo.

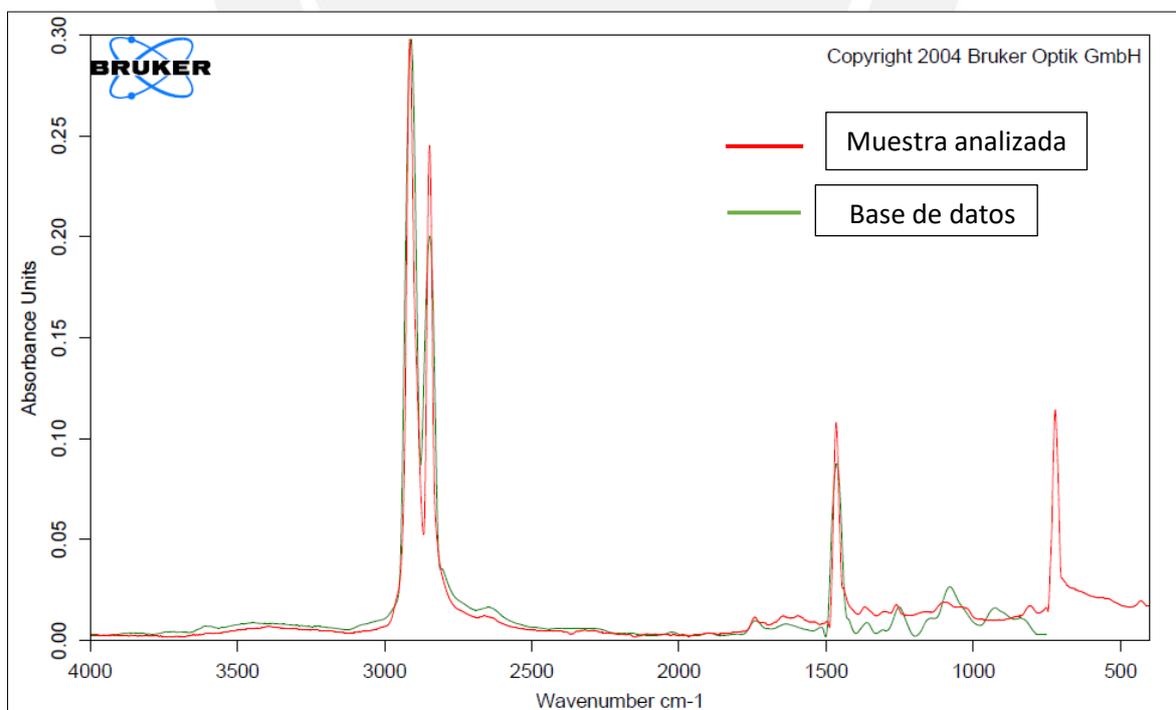


Figura 3.1. Espectros FTIR-ATR del polietileno

3.2.2. Índice de Fluidez (MFI)

Una de las herramientas más utilizadas para controlar las propiedades reológicas y calidad de los termoplásticos es el Melt Flow Index (MFI). El MFI ha sido aceptado como una muestra de la habilidad de un termoplástico para fluir. Como regla general, altos valores de MFI producirán una mejor fluidez en un polímero. (Rigail A. 2006)

En la tabla 3.5 se observa los resultados obtenidos, en la cual se observa que el MFI promedio del Polietileno Virgen es 1.577 g/10min y del polietileno reciclado es 1.814 g/10min, lo que quiere decir que el valor del material reciclado aumentó en 15% respecto al material virgen, lo que significa es que si el índice de fluidez aumenta, la viscosidad del polietileno reciclado disminuye.

El valor del MFI también nos indica que tipo de proceso de transformación es adecuado. Se podría decir que un MFI alto es adecuado para el proceso de inyección.

Tabla 3.5. Índices de fluidez del PEADV y PEADR. (Arribasplata Seguin A. 2016)

PEADV		PEADR	
Masa de filamento	Índice de fluidez	Masa de filamento	Índice de fluidez
$m_{fV} - [g]$	$MFI_V - [g/10 \text{ min}]$	$m_{fR} - [g]$	$MFI_R - [g/10 \text{ min}]$
0,4665	1,555	0,5337	1,779
0,4668	1,556	0,5355	1,785
0,4698	1,566	0,5382	1,794
0,4731	1,577	0,5385	1,795
0,4737	1,579	0,5397	1,799
0,4740	1,580	0,5451	1,817
0,4749	1,583	0,5457	1,819
0,4764	1,588	0,5541	1,847
0,4776	1,592	0,5547	1,849
0,4788	1,596	0,5553	1,851
Promedio		Promedio	
$\overline{MFI}_V = 1,577 \text{ (g/10min)}$		$\overline{MFI}_R = 1,814 \text{ (g/10min)}$	

3.2.3. Calorimetría diferencial de Barrido

De acuerdo al ensayo realizado, se muestran las curvas de calentamiento y enfriamiento. En la tabla 3.6 se muestra los valores aproximados de los parámetros involucrados.

Tabla 3.6. Propiedades térmicas del Polietileno

Propiedad	símbolo	Valor	Unidad
Temperatura de fusión	T_f	131.8	°C
Temperatura de cristalización	T_c	112.7	°C

Entalpia de Fusión	Δh_f	116.25	mJ/mg
Entalpia de Cristalización	Δh_c	-114	mJ/mg
Grado de Cristalinidad	X_c	74.28	%

La temperatura de fusión se calcula integrando las áreas bajo las curvas endotérmicas. Por otro lado el porcentaje de cristalinidad se obtiene mediante la siguiente formula:

$$X_c = \frac{\Delta h_{fc}}{\Delta h_{fc}^0} \times 100 (\%) \quad (3.1)$$

Donde Δh_{fc} es la entalpia de fusión térmica para el polietileno obtenida del ensayo DSC y Δh_{fc}^0 es la entalpia de fusión térmica para el polietileno de alta densidad, cuyo valor es 293J/g (Janimak, 2001)

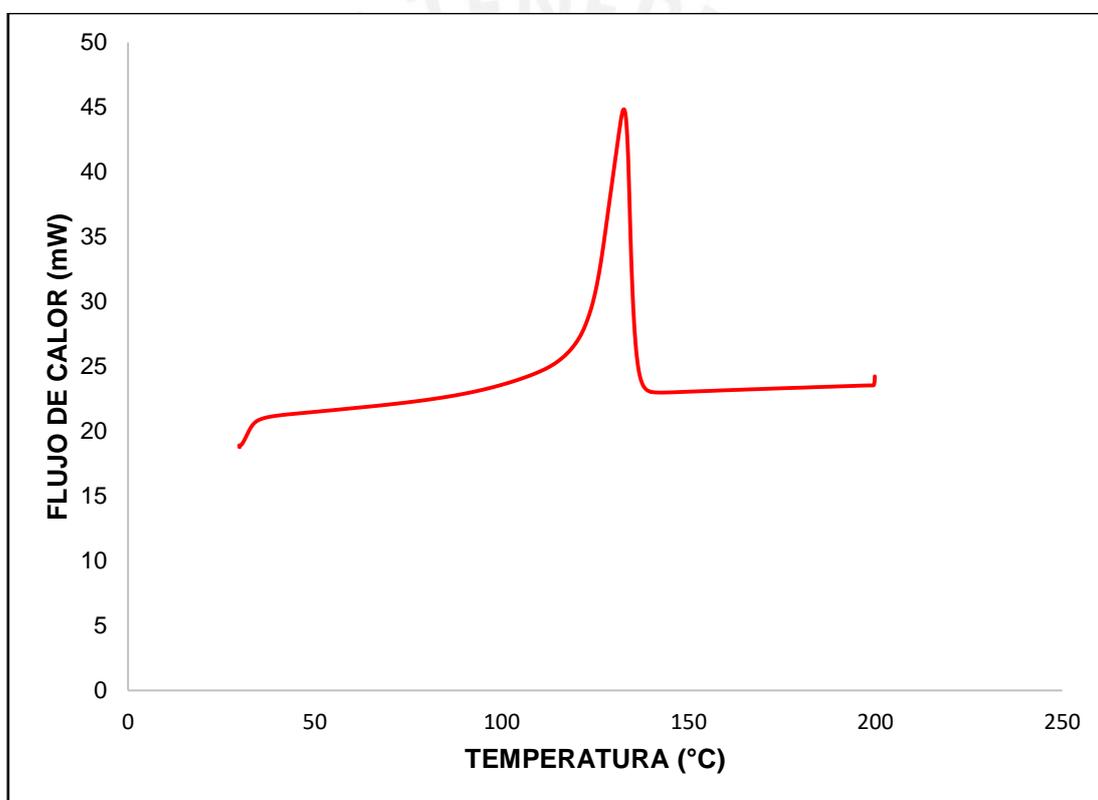


Figura 3.2. DSC del Polietileno en calentamiento.

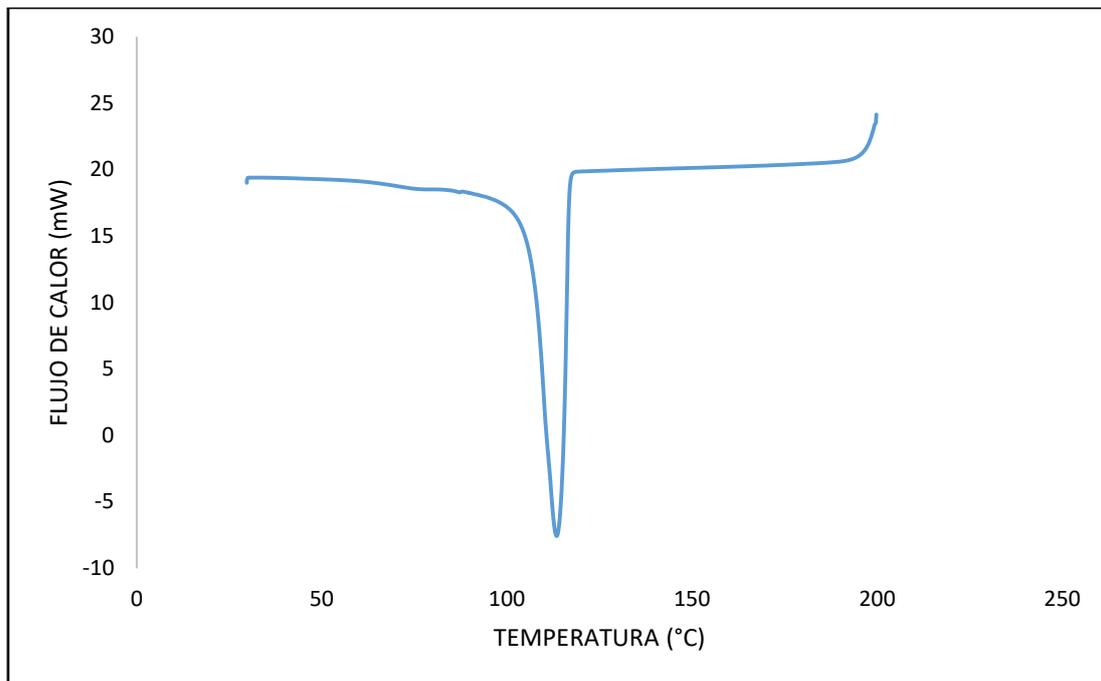


Figura 3.3. DSC del polietileno en enfriamiento

3.2.4. Análisis Térmico gravimétrico (TGA)

El análisis termo gravimétrico del polietileno se realiza en una atmosfera inerte de nitrógeno a una velocidad de calentamiento de 10°C/ min. Según muestra la gráfica, el polietileno empieza a degradarse a partir de los 350 °C

Según los estudios realizados por Peterson (2001) sobre el TGA del polietileno en aire y en N₂, se encontró que en presencia de oxígeno, las temperaturas de degradación son más bajas. Por consiguiente de los resultados obtenidos del TGA en una atmosfera inerte se concluye que la degradación del polietileno en ausencia de oxígeno es mínima a las temperaturas de trabajo. Por otro lado, si se tiene temperaturas muy altas tiene a degradarse en presencia de la atmosfera inerte.

Esta descomposición térmica que sufren las poliolefinas, viene acompañada por pérdidas de peso que se van produciendo de acuerdo a la velocidad de calentamiento, se fue puede este fenómeno desde las temperaturas 220°C hasta aproximadamente los 590°C.

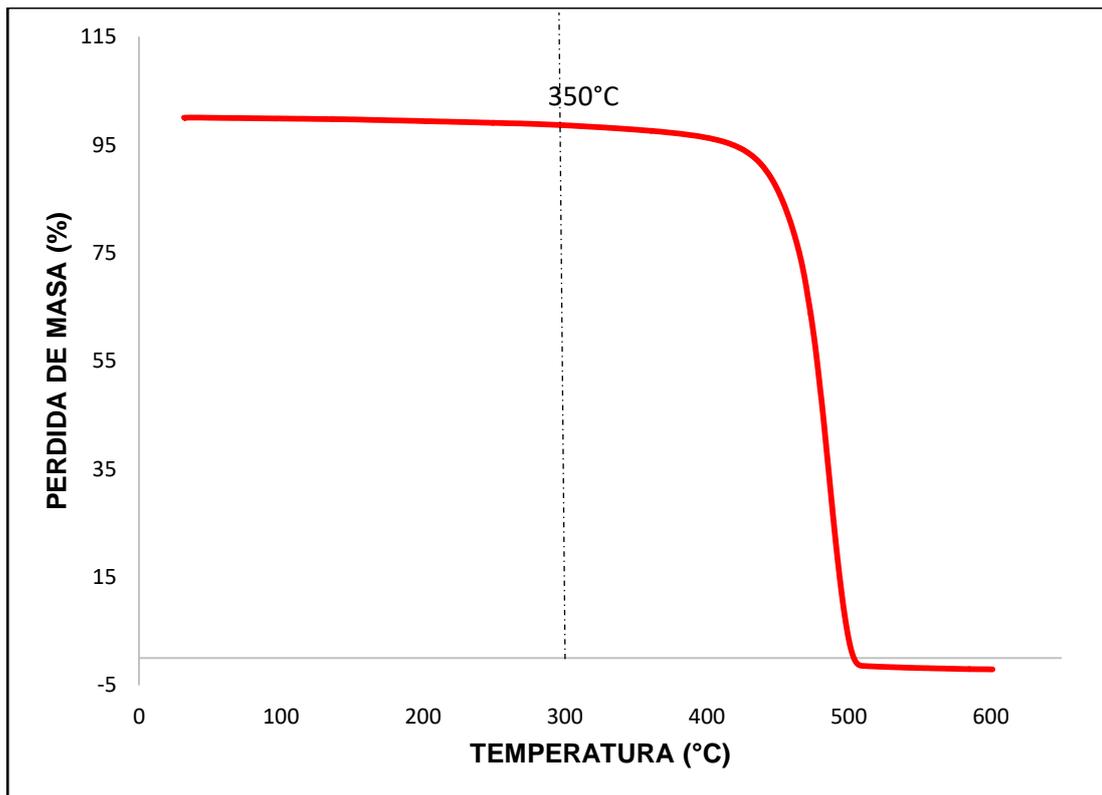


Figura 3.4. TGA del polietileno de alta densidad

3.3. Determinación de los parámetros del proceso de sinterizado.

Para poder determinar los parámetros de proceso de esta investigación se han utilizado diferentes variables de proceso las cuales se pueden observar en la tabla 3.7.

Tabla 3.7. Variables involucradas en el proceso de sinterizado

VARIABLES	DENOTACION	UNIDAD
Tamaño de partícula de la madera	MR	mm
Cantidad de partículas de madera	MC	%
Cantidad de polietileno	PE	%
Temperatura de trabajo	T_w	°C
Tiempo de permanencia en el horno	t_w	min
Tiempo de prensado	t_{pr}	min
Tiempo de enfriamiento	t_e	min
Presión máxima aplicada	P	Bar

a. Tamaño de partículas de madera

Para iniciar la parte experimental de esta investigación se realizó el tamizado de la madera en 5 mallas normalizadas (MR1, MR2, MR3, MR4, MR5), de las cuales para nuestro estudio se utilizó como tamaños de partículas MR1, MR2 y MR3, considerando que los Tamaños MR4 y MR5 ya tienen una granulometría con la cual ya podemos considerarlos como polvo de madera.

Para la primera parte de la investigación se consideró trabajar con el tamaño de partículas MR2, teniendo en cuenta que en investigaciones anteriores, con este tamaño de partícula se había encontrado buenas propiedades.

b. Presión ejercida

Para el caso de la presión ejercida por la prensa, está ya regulada y se empleará 70 bar y se mantendrá constante durante toda la investigación.

La presión ejercida es muy importante debido a que ayuda al plástico a cubrir la madera ocupando los espacios vacíos entre cada partícula, además que permite tener una muestra plana compacta

c. Tiempo de prensado y tiempo de enfriamiento

Cabe mencionar que el tiempo de prensado es a su vez el tiempo de enfriamiento, el cual se dará por convección natural. Se consideró que este tiempo sea 10 min, debido a que en moldeos anteriores con tiempos menores no se podía realizar una buena extracción de la muestra.

d. Temperatura y tiempo de trabajo

Para poder encontrar los parámetros de proceso de sinterizado, se realizará pruebas de moldeo, con temperaturas que estén por encima de la temperatura de fusión del polímero ($T_f = 135^\circ\text{C}$)

Cuando se inició el moldeo por compresión, se eligió como temperatura de trabajo inicial la temperatura de fusión del polímero, sin embargo el plástico no logro fundirse por completo ni bañar a la madera y por eso se optó por continuar con temperaturas por encima de la fusión.

Tabla 3.8. Temperaturas y tiempos de trabajo (Parte experimental I)

t (min) / T°C	145°C	155°C	165°C	175°C	185°C
35 min	-		3	3	3
40 min	3	3	3	3	-
50 min	3	3	3	3	-
60 min	3	3	3	3	-
70 min	3	3	3	3	-

e. Proceso de sinterizado

Para la primera parte de la investigación se elaboraron muestras a diferentes temperaturas y tiempos mostrados en la tabla 3.8. , estas muestras fueron convertidas en probetas para poder realizar el ensayo de descarte (ensayo de

flexión), con lo cual se elige el tiempo optimo y la temperatura optima de sinterizado.



T°=155°C, t=40 min



T°=155°C, t=50 min



T°=155°C, t=60 min



T°=155°C, t=70 min

Figura 3.5. Probetas moldeadas a tiempos diferentes. (Sección transversal)

En la figura 3.5 se puede observar, como a medida que aumenta el tiempo de permanencia en el horno, se obtiene una mejor adhesión de partículas

A continuación se muestran los resultados del ensayo de flexión de las 114 probetas que obtuvieron de las 57 muestras moldeadas en la primera parte experimental.

Tabla 3.9. Resistencia y módulo Elástico de flexión (70% -30%) A 145°C

Tiempo (min)	40	50	60	70
E_{prom} (MPa)	861.86	1074.85	1085.92	1008.23
Rb_{prom} (MPa)	12.87	14.61	19.60	20.84

Tabla 3.10. Resistencia y módulo Elástico de flexión (70%-30%) a 155°C

Tiempo (min)	40	50	60	70
E_{prom} (MPa)	1058.11	1095.12	1144.58	1049.31
Rb_{prom} (MPa)	17.86	19.63	21.87	20.71

Tabla 3.11. Resistencia y módulo Elástico de flexión (70%-30%) a165°C

Tiempo (min)	35	40	50	60	70
E_{prom} (MPa)	1195.42	1213.23	1281.69	1222.56	990.65
Rb_{prom} (MPa)	22.50	24.00	24.04	22.90	18.26

Tabla 3.12. Resistencia y módulo Elástico de flexión (70% -30%) a 175°C

Tiempo (min)	35	40	50	60	70
E_{prom} (MPa)	1295.18	1309.15	1189.56	1173.25	813.39
Rb_{prom} (MPa)	23.22	24.23	20.59	18.03	15.19

Tabla 3.13. Resistencia y módulo Elástico de flexión (70%PE-30%MC) a 185°C

Tiempo (min)	35
E_{prom} (MPa)	1305.75
Rb_{prom} (MPa)	23.93

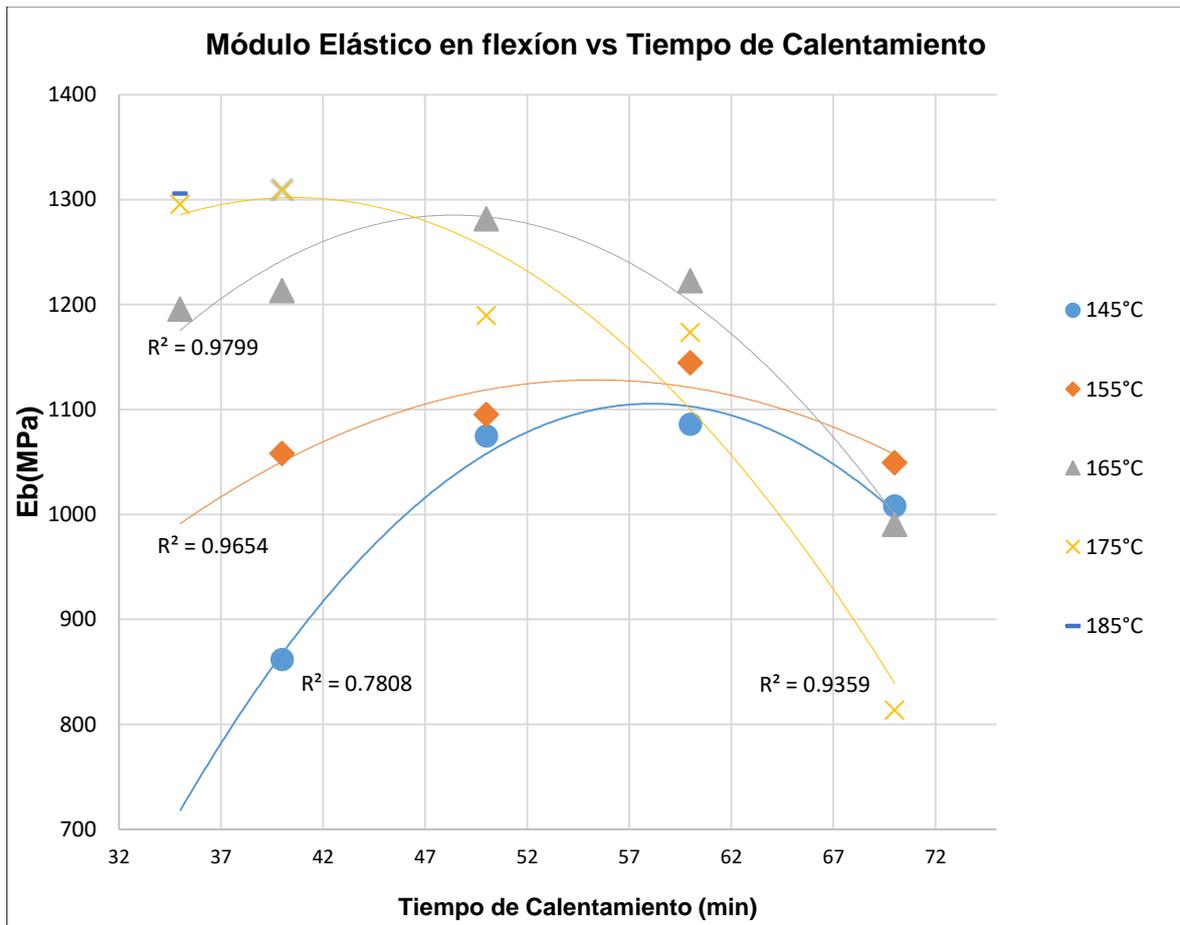


Figura 3.6. Modulo elástico en flexión en función del tw de trabajo

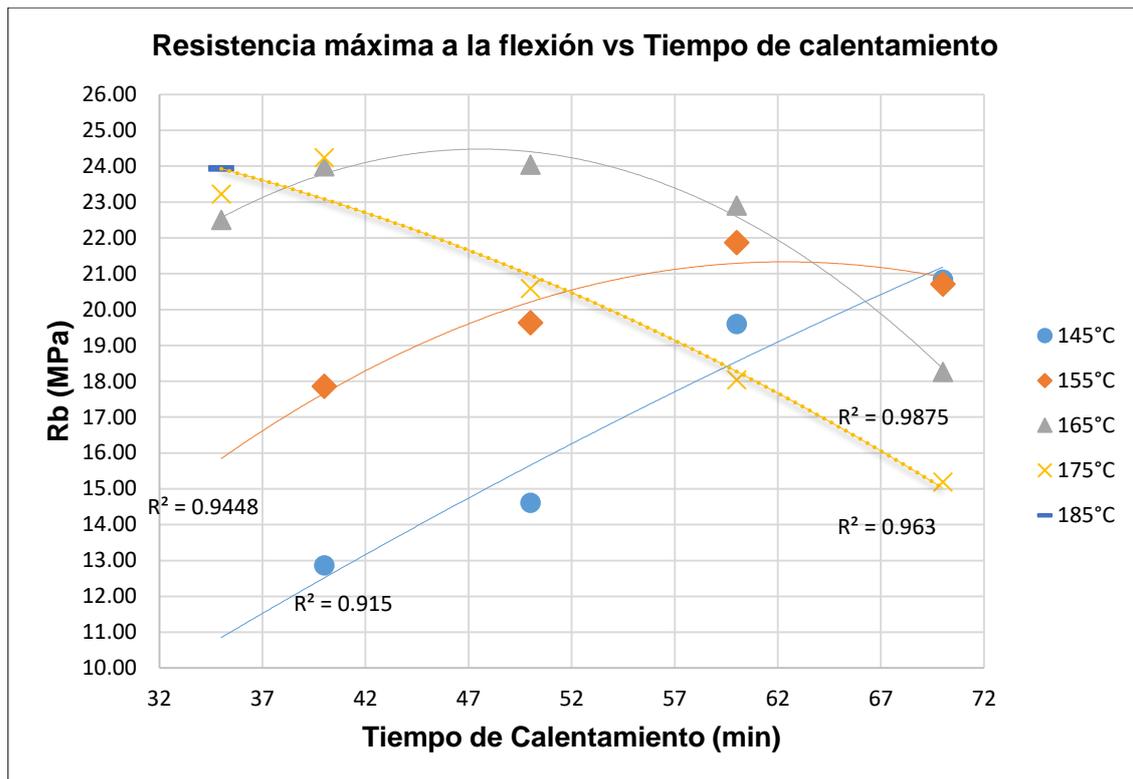


Figura 3.7. Resistencia a la flexión en función del t_w de trabajo

De los valores mostrados en las diferentes tablas, se observa que el comportamiento del material compuesto a la misma temperatura de trabajo, conforme avanza el tiempo de permanencia del material compuesto en el horno, las propiedades mecánicas R_b y E , van aumentando hasta un tiempo máximo donde empiezan a disminuir.

Por ejemplo para el caso del Módulo elástico a una temperatura de 155°C , sus propiedades aumentan hasta un tiempo máximo de 60 min, pero ya para un tiempo de 70 min ya empieza a disminuir.

Lo mismo sucede para la Resistencia máxima a la flexión, para una temperatura de 155°C aumenta hasta un tiempo de 60 min, posteriormente para un tiempo de 70 min la resistencia disminuye.

En otro sentido de análisis de las gráficas para un mismo tiempo de permanencia en el horno, las propiedades tanto resistencia como modulo elástico aumentan, sin embargo en la mayoría de casos a la temperatura de 175°C , empiezan a disminuir.

Existen diversas razones por las cuales las propiedades empiezan a disminuir a partir de un tiempo determinado y a una temperatura determinada. Siguiendo con la investigación una de razones es la presencia de humedad en la madera, teniendo en cuenta el porcentaje de absorción de agua de la madera, ya mencionado anteriormente.

Para mejorar este punto se podría secar la madera, la cual sería una etapa más en el proceso de fabricación y por ende generaría un mayor costo.

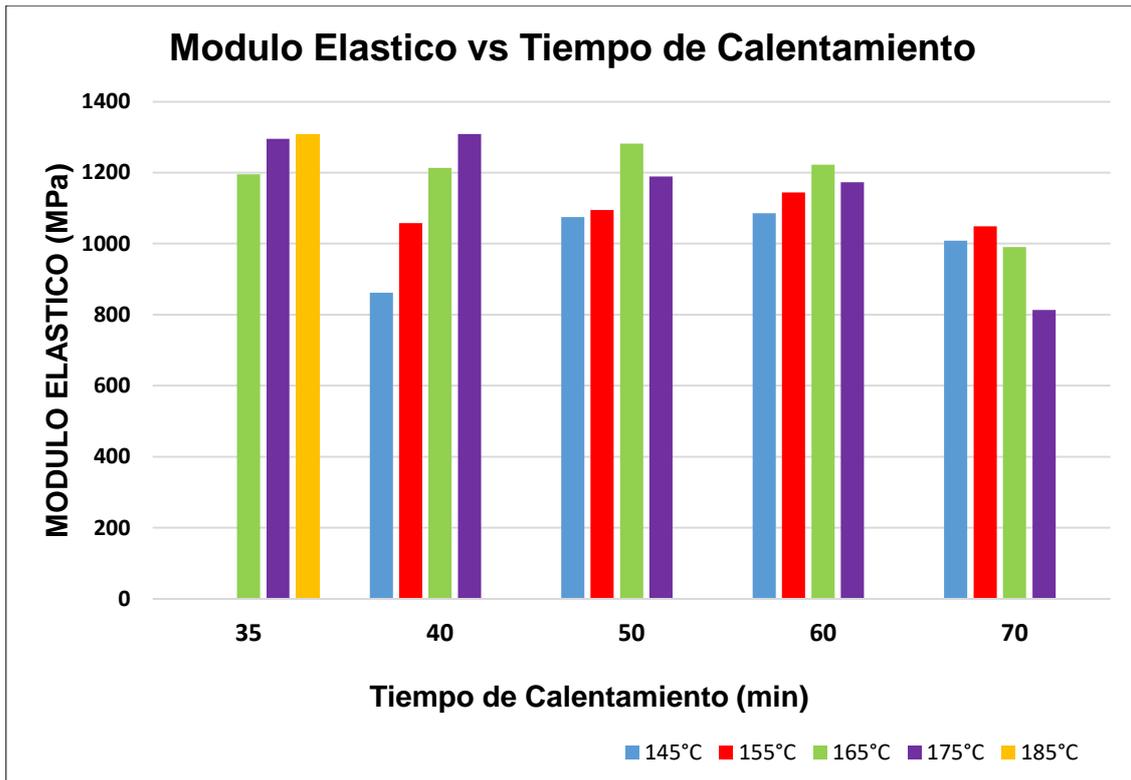


Figura 3.8. Modulo elástico en flexión vs tiempo de calentamiento.

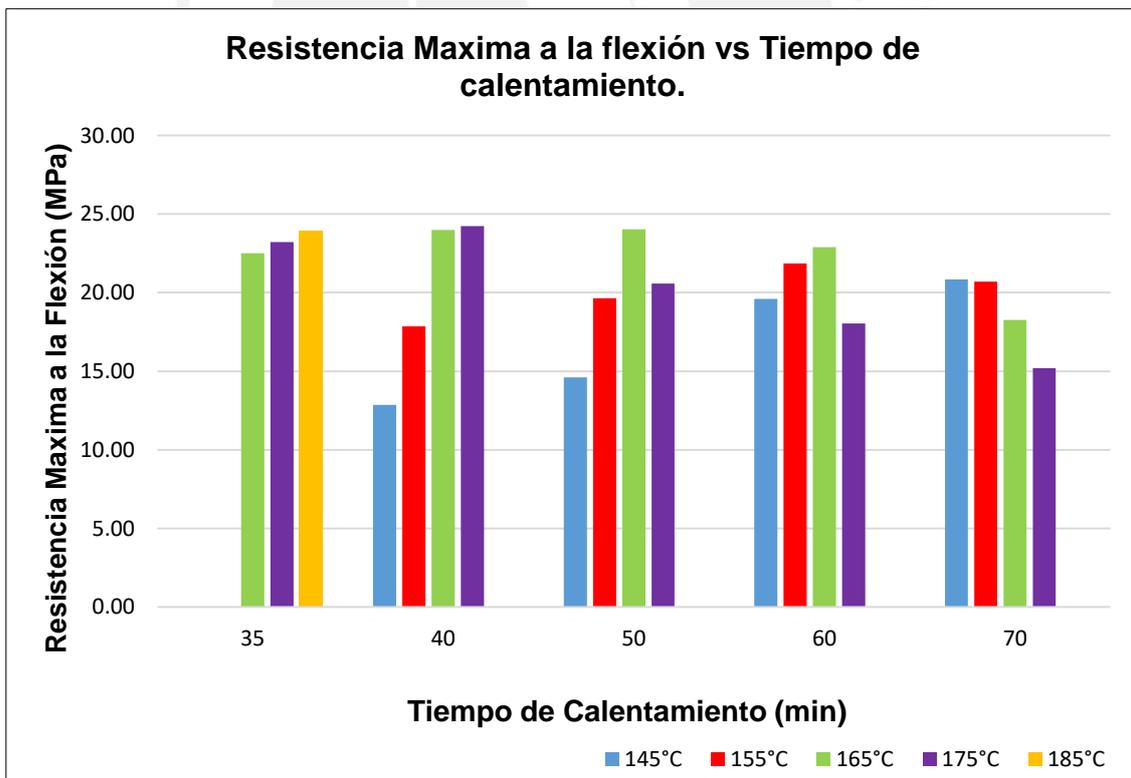


Figura 3.9. Resistencia Máxima a la Flexión vs Tiempo de calentamiento

Considerando los resultados y las tendencias obtenidas se llegó a la conclusión de que las mejores propiedades de Modulo elástico en flexión y Resistencia máxima a la flexión se dan a 175°C y a 40 min, por consiguiente se toma estos valores como la temperatura y el tiempo “óptimo” de sinterizado.

Para la segunda parte de la investigación se mantendrá fijo estos parámetros óptimos y se variará el tamaño de partícula de la madera y el porcentaje en volumen de la mezcla.

Tabla 3.14. Condiciones óptimas de Sinterizado de material compuesto de polietileno y partículas de madera capirona

Variable	Valor	Unidad
Temperatura de sinterizado	175	°C
Tiempo de sinterizado	40	Min
Presión máxima aplicada	70	Bar
Tiempo de prensado y enfriamiento	10	Min

3.4. Resultados de los ensayos de los materiales compuestos fabricados.

En esta etapa de la investigación se realizó el moldeo por compresión con los parámetros óptimos variando el tamaño de partícula de la madera y el porcentaje de la proporción en volumen del plástico-madera.

Tabla 3.15. Distribución de muestras moldeadas en la segunda parte experimental

	% PLASTICO - MADERA	MR1	MR2	MR3
	175°C y 40 min	100-0%	p1, p2, p3	
70 -30 %		m1	m4	m7
		m2	m5	m8
		m3	m6	m9
60-40%		m10	m13	m16
		m11	m14	m17
		m12	m15	m18
50-50%		m19	m22	m25
		m20	m23	m26
		m21	m24	m27

Los ensayos mecánicos físicos y térmicos que se realizaron en la segunda parte experimental se muestran en la tabla 3.16.

Tabla 3.16. Ensayos físicos realizados para la caracterización del material compuesto

Ensayo	Norma
Ensayo de flexión	ASTM D 1037-06a
Densidad	ASTM D792-13
Absorción de agua	ASTM D 1037-06a

3.4.1. Ensayo de flexión

Con los resultados obtenidos a partir del ensayo flexión de las probetas de CPM de la segunda parte experimental, se obtienen graficas que permiten analizar estas propiedades para cantidad en volumen y tamaño de partícula de la madera.

Los resultados se presentan a continuación en las tablas 3.17 y 3.18.

Tabla 3.17. Valores de Módulo Elástico de las muestra (segunda parte)

MEZCLAS Y PROPORCIONES	Eb(prom) (MPa)	Desviación estándar	CV (%)
F175-40-PEAD-100%	1154.34	101.71	8.81
F175-40-MR1-70/30	1176.21	16.98	1.44
F175-40-MR1-60/40	1269.81	66.59	4.32
F175-40-MR1-50/50	1267.06	66.59	5.26
F175-40-MR2-70/30	1302.15	10.98	0.84
F175-40-MR2-60/40	1312.32	62.37	4.75
F175-40-MR2-50/50	1217.31	52.05	4.28
F175-40-MR3-70/30	1183.85	59.40	5.02
F175-40-MR3-60/40	1238.71	67.10	5.42
F175-40-MR3-50/50	1185.14	84.93	7.17

Tabla 3.18. Valores de la Resistencia Máxima a la flexión (segunda parte)

MEZCLAS Y PROPORCIONES	Rb(prom) (MPA)	Desviación estándar	CV (%)
F175-40-PEAD-100%	32.02	0.21	0.65
F175-40-MR1-70/30	23.13	0.46	1.98
F175-40-MR1-60/40	19.97	0.62	3.11
F175-40-MR1-50/50	18.68	0.85	4.54
F175-40-MR2-70/30	24.55	1.54	6.28
F175-40-MR2-60/40	21.29	0.97	4.56
F175-40-MR2-50/50	20.28	0.97	4.80
F175-40-MR3-70/30	24.86	0.55	2.21
F175-40-MR3-60/40	22.76	0.66	2.89
F175-40-MR3-50/50	18.78	0.98	5.22

En la figura 3.10 se muestra la gráfica del Módulo Elástico vs % madera capirona, para el tamaño de partícula MR2 (≤ 3.33 mm) y se observa una pequeña dispersión en los valores, lo cual es demostrado al verificar el valor del coeficiente de correlación R2 igual 0.9565, de la misma manera se analizan para otros tamaños de partícula. Se observa que a medida que aumenta el porcentaje de madera el modulo Elástico va aumentando hasta un punto que empieza a disminuir. Lo cual significa que se necesita una temperatura más alta para que el plástico fluya más y pueda bañar todas las partículas de madera.

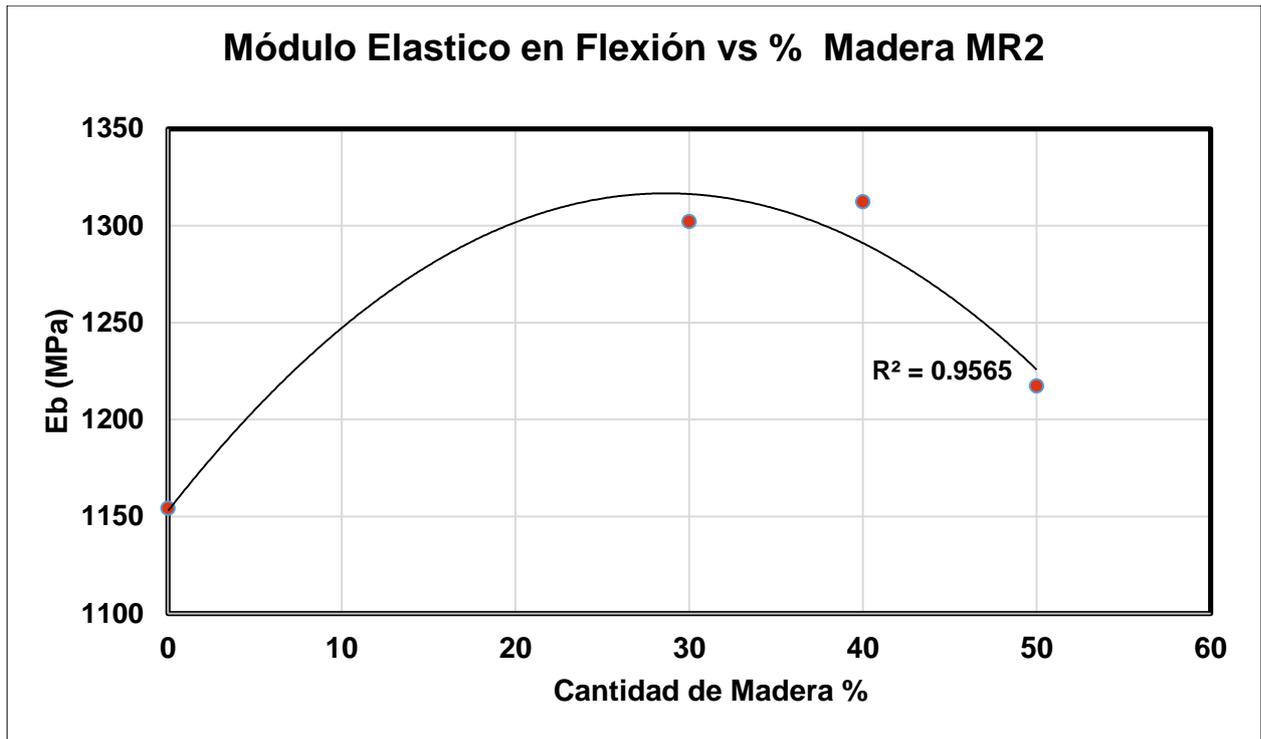


Figura 3.10. Módulo Elástico Vs % madera capirona, tamaño MR2 (≤ 3.33 mm)

En la figura 3.11 observamos la gráfica de Resistencia máxima a la Flexión vs % madera capirona MR2. En esta grafica podemos observar que el punto más alto corresponde al porcentaje 0% de madera, es decir plástico puro y mientras se adicionando madera la resistencia disminuye.

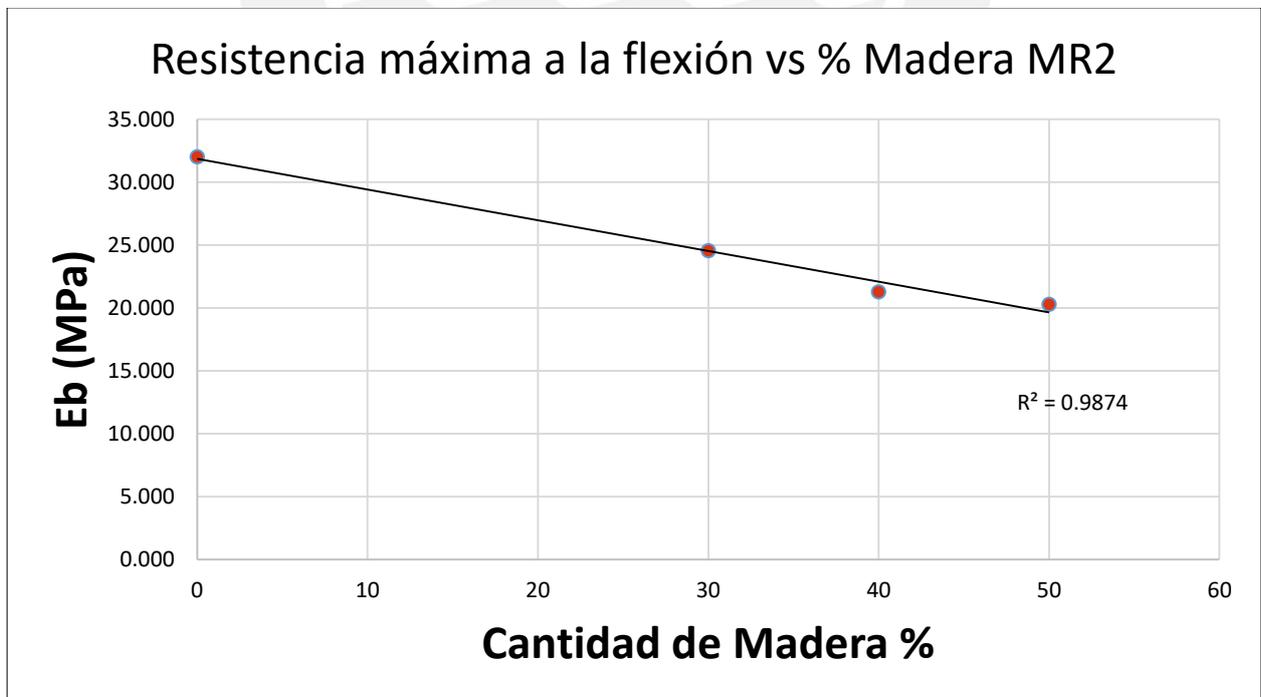


Figura 3.11. Resistencia máxima a la flexión vs % madera capirona MR2 (≤ 3.33 mm)

En la **figura 3.12** se la gráfica de Resistencia máxima a la flexión vs tamaños de partículas, esta gráfica involucra los tres tamaños de partículas (MR1, MR2, MR3) con los diferentes porcentajes en volumen plástico-madera.

Podemos observar en dicha grafica que para un mismo tamaño de partícula, a medida que aumenta la cantidad de madera en la muestra, la resistencia máxima a la flexión disminuye, esta tendencia se observa en los tres tamaños de partícula. Lo mismo se observa en el caso del plástico puro, donde el valor de la resistencia está muy por encima de los demás porcentajes.

Si se analiza los valores de acuerdo a los porcentajes de plástico madera, se puede decir que a medida que el tamaño de partícula disminuye, la resistencia máxima a la flexión aumenta, sin embargo para el porcentaje 50-50% para el tamaño de partícula más pequeño (MR3) no aumenta sino disminuye, lo cual se explica que para dicho porcentaje no existe una buena homogenización de mezcla, el plástico no logra bañar a toda la madera.

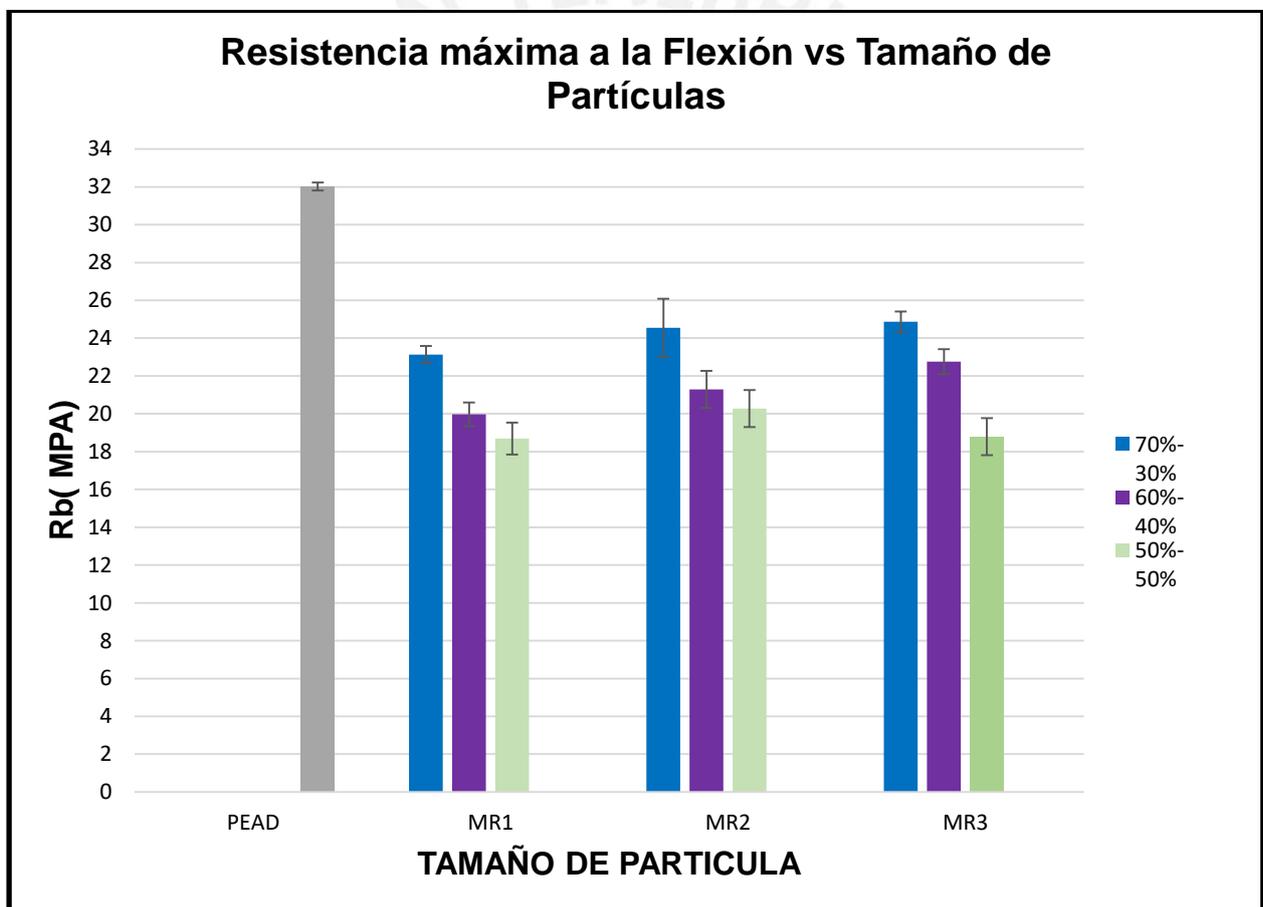


Figura 3.12 Resistencia Máxima a la flexión vs tamaño de partícula.

En la **figura 3.1** se observa la gráfica de Modulo elástico vs tamaño de partícula, esta grafica involucra a todos los tamaños de partícula (MR1, MR2, MR3) con los diferentes porcentajes en volumen del plástico-madera.

En esta grafica podemos observar que para un mismo tamaño de partícula, por ejemplo MR1, a medida que aumenta el porcentaje de madera, el modulo elástico aumenta, y se debe a que la presencia de la madera vuelve al material más rígido, lo cual eleva el valor de su módulo elástico, sin embargo esto no sucede para el porcentaje 50-50% de plástico-madera, el valor del módulo elástico disminuye en comparación con un porcentaje menor de madera. Esto se podría explicar de tal forma que no se haya tenido una buena mezcla homogénea antes de que el material ingrese al horno, y también se podría decir de que para ese porcentaje se necesita una mayor temperatura de trabajo para que el plástico fluya de tal forma que bañe a toda la madera dentro del molde.

Se observa también que cuando se tiene plástico puro, el valor del módulo elástico es menor que cuando agregamos cierta cantidad de partículas de madera.

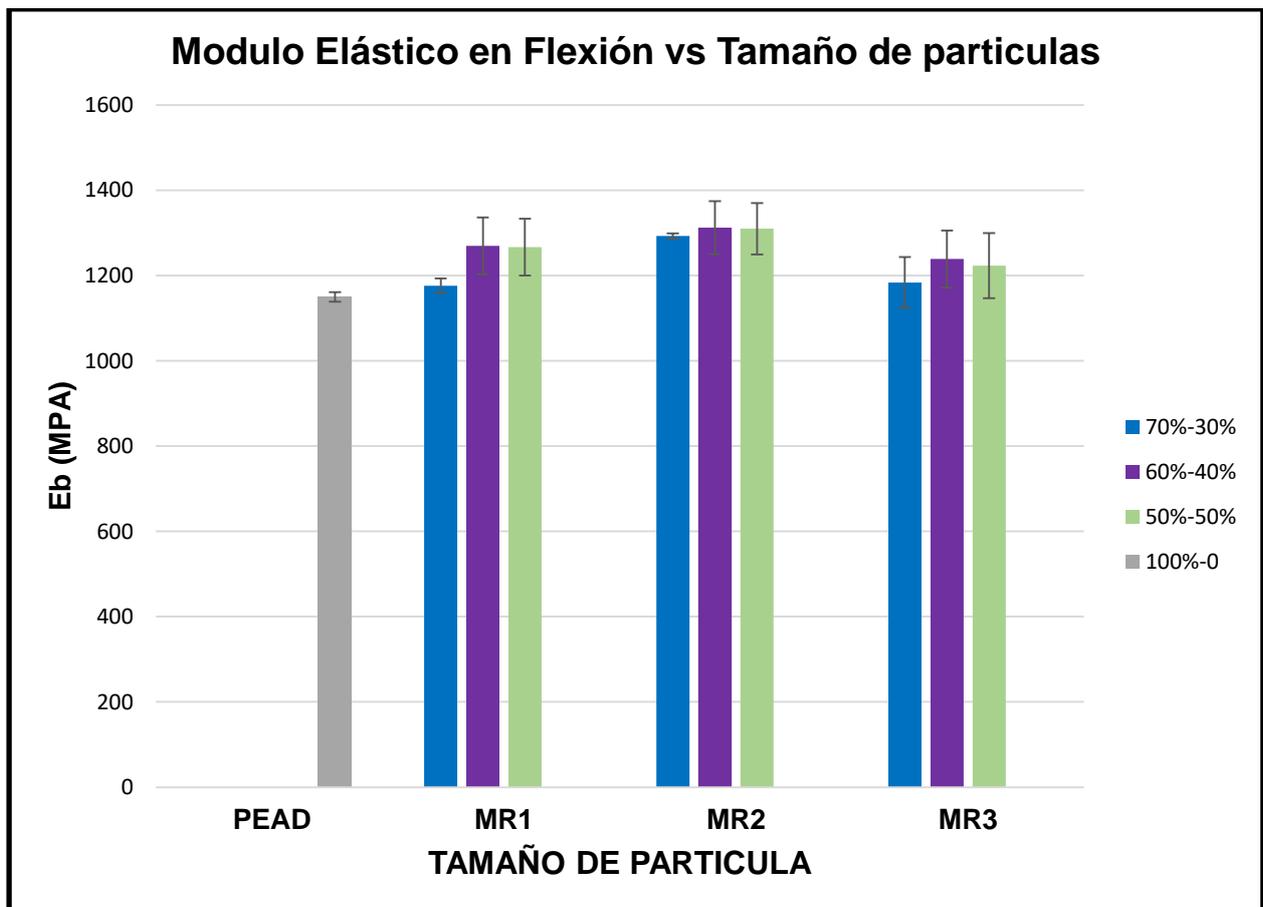


Figura 3.13. Módulo Elástico en Flexión vs Tamaño de partículas

3.4.2. Ensayo de Densidad

La densidad es una propiedad importante en los termoplásticos debido a que permite identificar un material. Las variaciones de densidad observadas en la tabla 3.19 pueden ser producto de absorción de solvente, cambios en la cristalinidad, etc. Para este ensayo se obtuvieron muestras de las probetas de flexión, de las cuales se determinó que la densidad promedio del material compuesto es 0.889 g/cm³.

Tabla 3.19. Resultados de Densidad del material compuesto.

	DENSIDAD	DESV. EST.
PEAD PURO	0.958	0.003
MR1 50-50	0.861	0.016
MR1 60-40	0.890	0.014
MR1 70-30	0.913	0.005
MR2 50-50	0.865	0.012
MR2 60-40	0.896	0.009
MR2 70-30	0.909	0.026
MR3 50-50	0.859	0.011
MR3 60-40	0.899	0.010
MR3 70-30	0.907	0.004

En la figura 3.14 se observa la gráfica de Densidad vs % Madera, en la cual observamos que mientras aumenta el porcentaje de madera en el material compuesto, la densidad disminuye y esto coincide con la fórmula de obtención de la densidad Teórica, la cual se obtiene de la siguiente manera:

$$\rho_{CPM} = \rho_{MC} \cdot f_{MC} + \rho_{PE} \cdot f_{PE} \quad (3.2)$$

Donde:

ρ_{CPM} = Densidad del compuesto de plástico y madera

ρ_{MC} = Densidad de la madera capirona = 0.7404 g/cm³

ρ_{PE} = Densidad del Polietileno virgen = 0.96 g/cm³

f_{MC} = Fracción en volumen de las partículas de madera

f_{PE} = Fracción en volumen de las partículas de polietileno

En la formula se verifica que mientras aumenta el porcentaje de madera en la muestra, la densidad disminuye, esto también se debe a que la densidad de la madera es menor a la densidad del plástico.

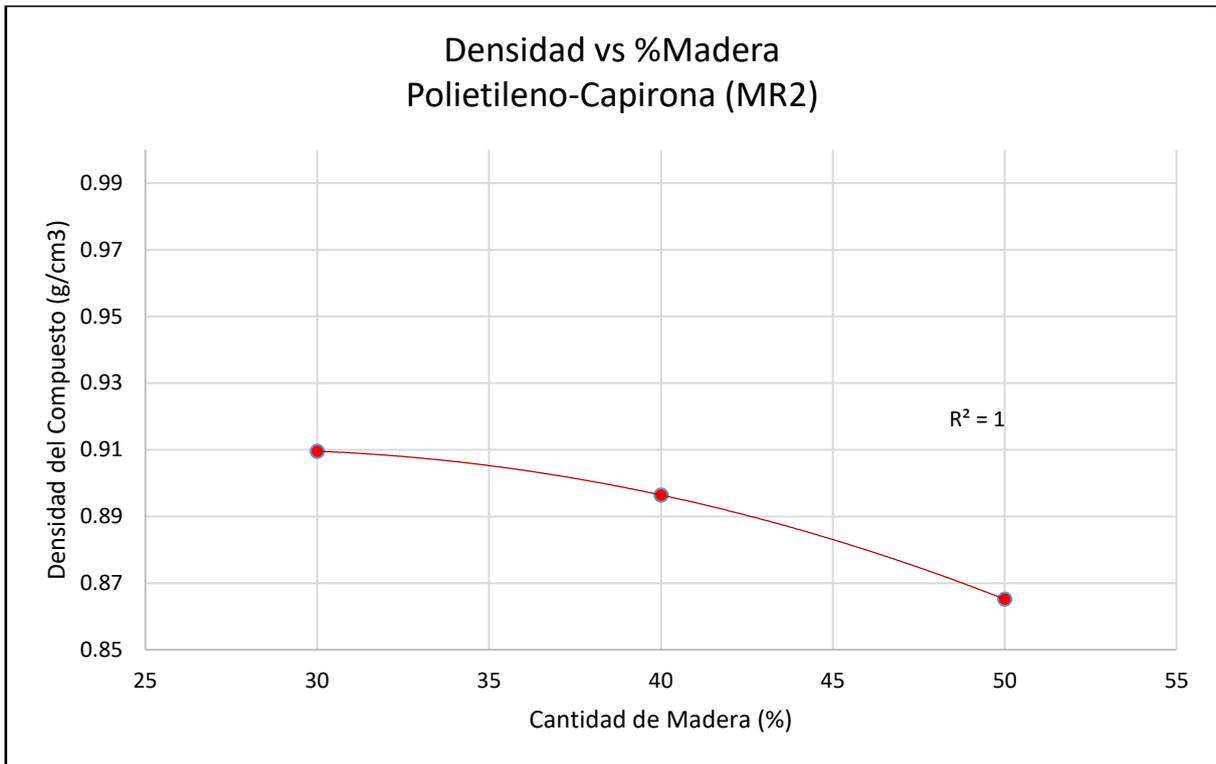


Figura 3.14. Densidad Vs % de Madera Capirona (MR2)

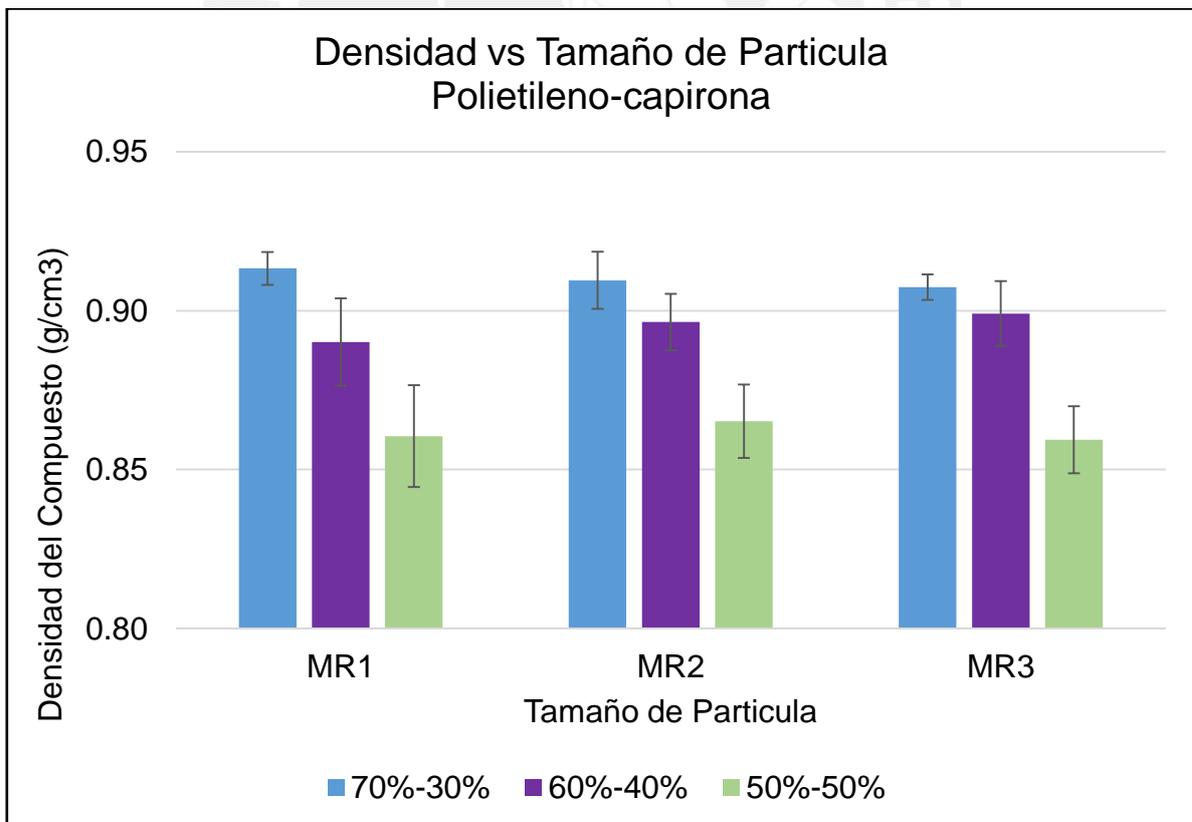


Figura 3.15. Densidad del Compuesto vs Tamaño de Partícula de madera

3.4.3. Ensayo de Absorción de agua

Según Mat-Shayuli, (2013) considera de que un polímero con una bajo valor de absorción de agua, pueden sufrir una degradación, por la cual las propiedades mecánicas y físicas se ven afectadas.

De los resultados obtenidos en el ensayo de absorción de agua se determinó que el promedio de absorción de agua del material compuesto es de 3.79 %.

Estos resultados no son tan homogéneos, debido a los diferentes tamaños de partícula, el tipo de madera y la concentración de extractivos que tenga. (Ashori A. 2010) Sin embargo se concluye que a menor tamaño de partícula, la cantidad de agua absorbida es menor y que para un mismo tamaño de partícula, a medida que aumenta el porcentaje de madera, la absorción de agua aumenta. Este resultado es lógico debido a que la madera se considera como un material higroscópico, ya que tiene siempre a absorber agua.

A continuación se presenta en la tabla 3.20 los resultados obtenidos del ensayo de absorción de agua.

Tabla 3.20. Resultados de Absorción de agua del material compuesto.

Clasificación	% de Absorción	DESV. EST.
PEAD PURO	0.31	0.21
MR1 50-50	6.34	0.69
MR1 60-40	4.30	0.86
MR1 70-30	2.26	0.48
MR2 50-50	6.17	0.67
MR2 60-40	3.24	0.35
MR2 70-30	2.19	0.25
MR3 50-50	5.96	0.53
MR3 60-40	2.38	0.32
MR3 70-30	1.31	0.08

De los resultados obtenidos verificamos que el mayor porcentaje de absorción de agua se dio en el tamaño más grande de partículas de madera (MR1) y para la proporción en volumen 50%-50% plástico-madera. El resultado es 6.3436% de absorción de agua.

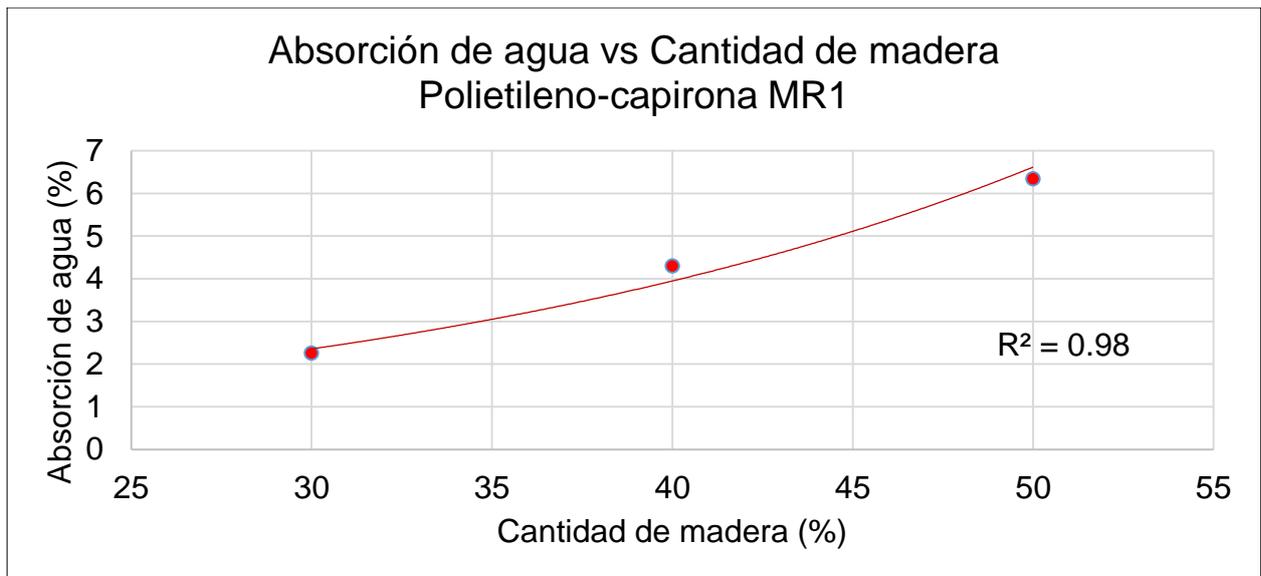


Figura 3.16. Absorción de agua Vs % de Madera Capirona (MR1)

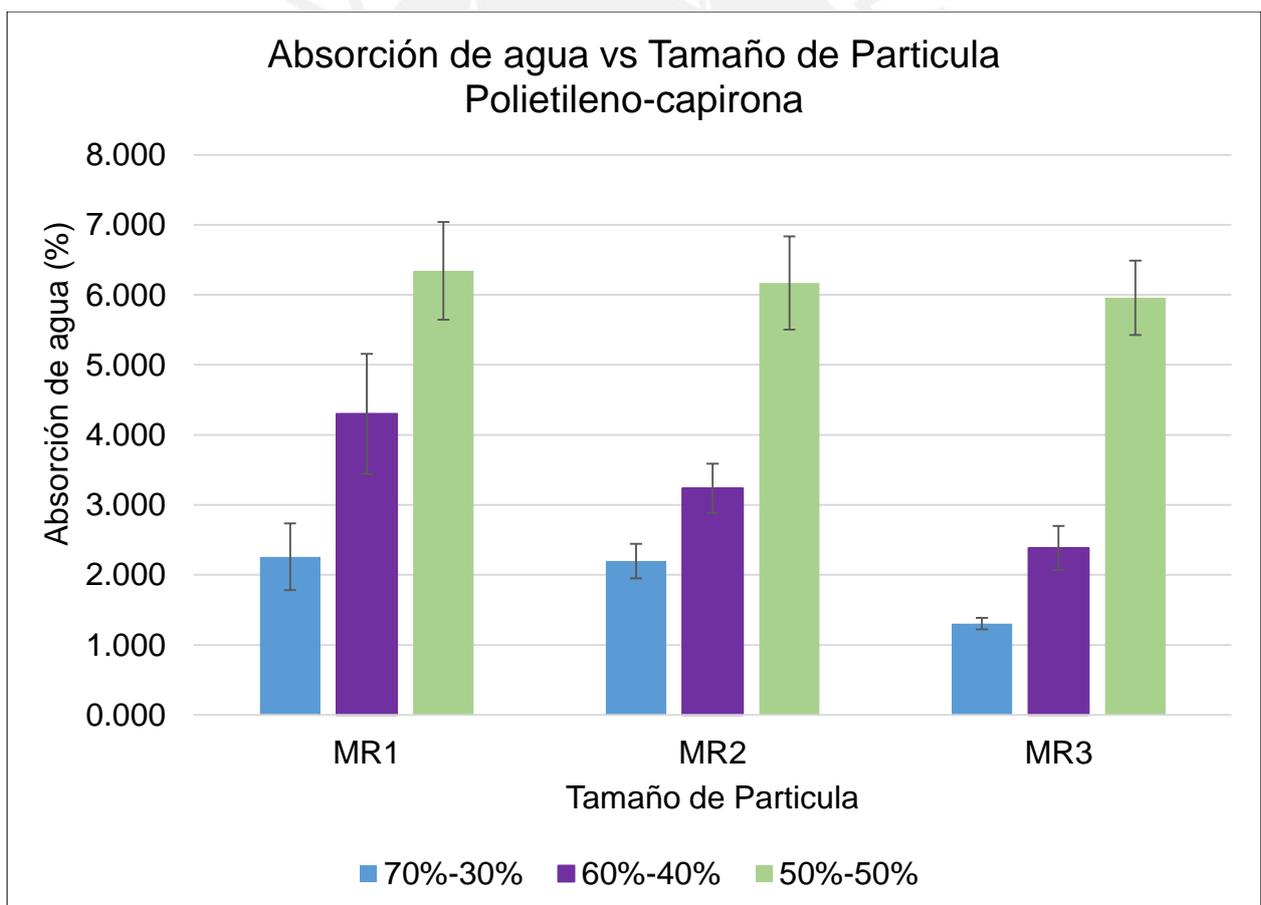


Figura 3.17. Absorción de agua vs Tamaño de Partícula de madera

3.4.4. Análisis Térmico

Para realizar este análisis se tomó como muestra los parámetros con las mejores propiedades mecánicas, la cual fue un CPM 175°C-40min-MR3-70%-30%. Según la gráfica de la figura 3.18 se observa que el material compuesto tiene un comportamiento parecido al polietileno, debido al alto contenido de plástico en la muestra. Se observan también que la primera pérdida de masa se da hasta los 150°C, esto se debe a la pérdida de agua y materiales volátiles presentes en el compuesto, la segunda pérdida de masa es más significativa y se da entre las temperaturas 260°C y 520°C y esto se debe principalmente por la degradación de la madera y del polietileno.

Se puede decir que existe una combinación idónea de temperatura y tiempo de moldeo, pues lo ideal es que sea una mayor temperatura y un menor tiempo de permanencia en el horno, sin embargo cuando las temperaturas son demasiado altas, la degradación se ve favorecida y esto influye en el decrecimiento de las propiedades mecánicas.

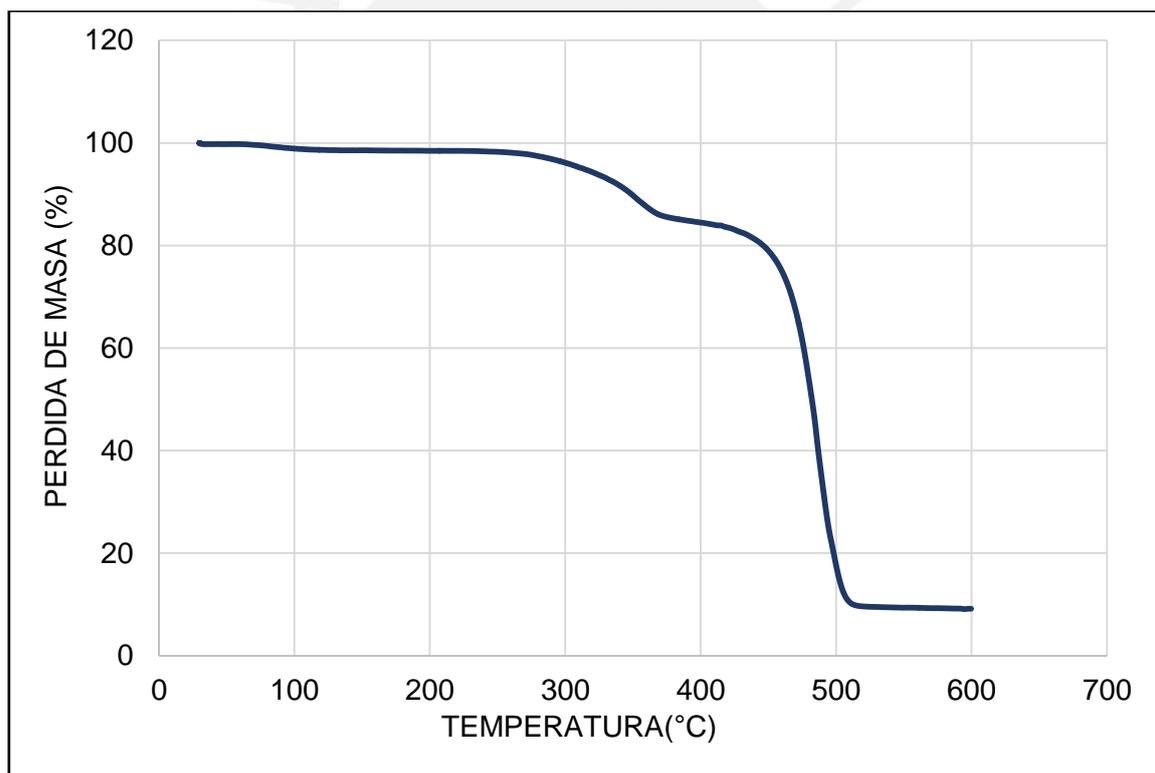


Figura 3.18. Análisis Termo gravimétrico del Compuesto (TGA)

3.4.5. Estereoscopio Óptico

De acuerdo a los resultados analizados en los distintos ensayos, las mejores propiedades mecánicas y físicas se presentan en el material compuesto con 70% de plástico y 30% de madera, para un tamaño de partícula MR3 (≤ 1.90 mm), mediante las imágenes del estereoscopio Óptico se corroboró estos resultados,

ya que se observa una buena adhesión entre el plástico y la madera, la cual influye en las propiedades.

A continuación se observa en las diferentes figuras las imágenes tomadas del estereoscopio óptico, para un tamaño MR3 y diferentes proporciones de plástico madera.

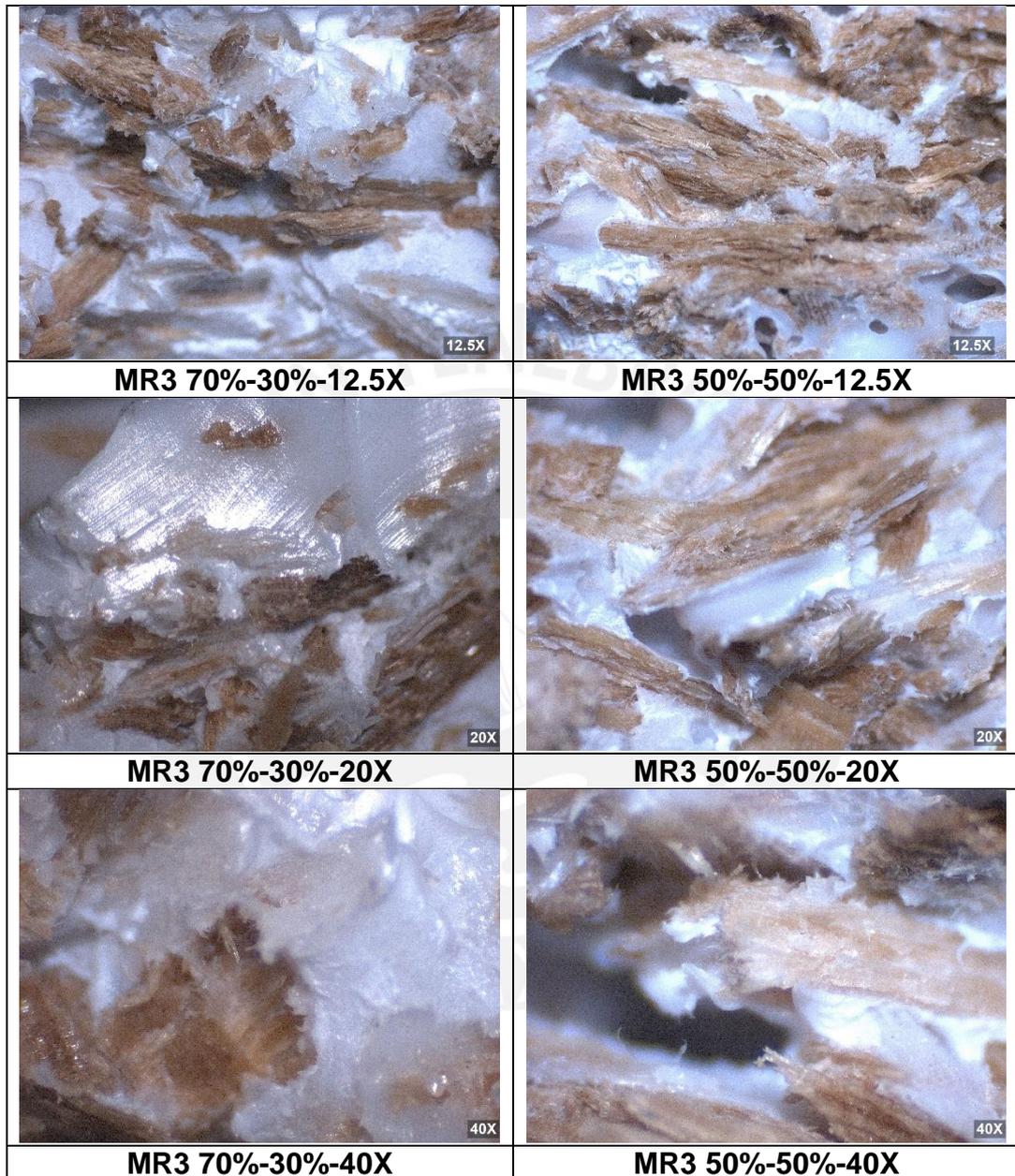


Figura 3.19. Vista al estereoscopio óptico en diferentes aumentos (12.5X, 20X y 40X) de la muestra con mejores propiedades y se compara con una muestra con propiedades inferiores. En la imagen de la izquierda se observa que las partículas de madera están embebidas por el plástico y una buena adhesión, mejor que en la muestra de la derecha

CONCLUSIONES

1. Se ha realizado el estudio del proceso de sinterizado de materiales compuestos, a partir de polietileno reciclado y madera capirona recuperada mediante moldeo por compresión, habiéndose determinado que los parámetros que definen el proceso de sinterizado son: temperatura de calentamiento del horno, tiempo de permanencia en el horno, presión de presando, tiempo de prensado y tiempo de enfriamiento. Las variables de proceso más importantes son la temperatura de calentamiento del horno y el tiempo de permanencia en el mismo. A mayores temperaturas y tiempos en el horno el sinterizado se favorece y es limitado por la degradación de los materiales. Se puede reducir el tiempo de calentamiento incrementando la temperatura y viceversa.
2. Los mayores valores de resistencia a la flexión se consiguen para un material compuesto de 70% de polietileno de alta densidad reciclado y 30% de madera capirona recuperada (% en volumen). Los mayores valores de módulo elástico en flexión se consiguen para un material compuesto de polietileno de alta densidad reciclado y partículas de madera capirona recuperada de 1.9 mm a 3.3 mm de tamaño.
3. El material compuesto de polietileno de alta densidad reciclado y madera capirona recuperada con mejores propiedades mecánicas se obtiene con los siguientes parámetros: 70% de polietileno de alta densidad reciclado y 30% de madera capirona recuperada (% en volumen) de 1.9 mm a 3.3 mm de tamaño, a una temperatura de 175°C y 40 minutos de calentamiento en el horno, 10 minutos de tiempo de enfriamiento bajo una presión de 70 bar. Para estas condiciones, la resistencia a la flexión es 25 MPa y el modulo elástico en flexión es 1293 MPa, la densidad 0.91 g/cm³ y la absorción de agua es 2.2 %.
4. Para un tamaño de partículas determinado, la resistencia a la flexión disminuye con la cantidad de madera. Para una composición determinada, la resistencia a la flexión aumenta muy poco con el tamaño de partículas de la madera.
5. Para un tamaño de partículas y una proporción determinados, el modulo elástico en flexión aumenta hasta un máximo con el tiempo de permanencia en el horno, debido a que el proceso de sinterizado se favorece con el tiempo; para luego disminuir posiblemente por el inicio de la degradación de uno de los constituyentes. Así, para el material compuesto de 70% de polietileno y 30% madera capirona recuperada de 1.9 mm a 3.3 mm de tamaño, el modulo elástico máximo es 1293 MPa y se obtiene a 175°C y 40 minutos de permanencia en el horno, siendo éstos los parámetros que garantizan un sinterizado óptimo para este caso.

6. Para un tamaño de partículas y una proporción determinados, el modulo elástico en flexión aumenta hasta un máximo conforme aumenta la temperatura de calentamiento en el horno. Dicho valor máximo se presenta cada vez a menor tiempo de permanencia en el horno a medida que se incrementa la temperatura de calentamiento.
7. De la caracterización de los materiales constituyentes se obtuvo que los valores promedios de la densidad de la capirona es 0.7404 g/cm^3 y su porcentaje de absorción de agua es 47.06% y para el polietileno la densidad es 0.9588 g/cm^3 y su porcentaje de absorción de agua es 0.31%. En comparación con los constituyentes el material compuesto tiene una densidad promedio de 0.898 g/cm^3 y un porcentaje de absorción de agua de 3.79 %. Estas propiedades físicas se ven influenciadas por la proporción plástico-madera y por el tamaño de partícula, lo que quiere decir que mientras aumenta la cantidad de madera, la densidad disminuye y la absorción de agua aumenta y por el contrario al disminuir el tamaño de partícula la densidad aumenta y la absorción de agua disminuye.
8. Las propiedades de resistencia a la flexión y modulo elástico de los materiales compuestos obtenidos en los diferentes parámetros de temperatura y tiempo, son mayores a los valores correspondientes a la madera capirona en la dirección transversal: $R_b = 7,6 \text{ MPa}$ y $E = 1259 \text{ MPa}$.
9. Como conclusión final de esta investigación, se puede decir que el material compuesto sinterizado de madera capirona y polietileno, presenta propiedades de rigidez y estabilidad térmica mejores que la del polietileno puro, y con respecto a la madera el compuesto presenta una mejor resistencia en flexión, menor absorción de agua y mayor estabilidad térmica.

BIBLIOGRAFIA

ALIREZA ASHORI

2008 "Municipal Solid waste as a source of lignocellulosic fiber and plastics for composites industries, Polymer-Plastic Technology and Engineering Journal"

ALIREZA ASHORI, AMIR NOURBAKHS

2009 "Characteristics of Wood-fiber plastic composites made of recycled materials."

ALIREZA ASHORI, AMIR NOURBAKHS

2010. "Reinforced Polypropylene composites: Effects of chemical compositions and particle size" Bioresource technology. Volumen 101, número 7, pp. 2515-2520

AMAZONIA VIVA- Conservación y valoración participativa del bosque y sus servicios ambientales.

S/f "Fichas comerciales de especies poco conocidas" Revista M&M El mueble y la madera. Bogotá pp 8.

ANANÍAS, R.

1992 "Física de la Madera". Departamento de Ingeniería en Maderas. Universidad del Bio-Bio. Chile. 41p

ANDRÉS F. RIGAIL-CEDEÑO

2006 "Aplicaciones del Melt Flow Index (MFI) en la industria de procesamiento de plásticos", Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP), Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)

ARTHUR N. WILKINSON AND ANTHONY J. RYAN,

1998 "Polymer Processing and Structure Development", Kluwer Academic Publishers, Dordrecht."

ARRIBASPLATA SEGUIN A.

2016 “Estudio del sinterizado de materiales compuestos de polietileno reciclado y madera capirona recuperada fabricados mediante moldeo rotacional”

ASHBY, M.F. y D.R.H. JONES

2013 “Engineering Materials 2: An introduction to Microstructures and Processing. Cuarta edición. Oxford: Elsevier

BALUARTE J., y NEBEL G.

2002 “Incremento diamétrico de guarea macrophylla vahl. Y calycophyllum spruceanum. HOOKER F.EX. SCHUMANN en bosques inundables de la amazonia peruana. Volumen 13 número 1-2, pp 109-125

COORPORACIÓN CHILENA DE LA MADERA (CCM)

2003 “Manual para la Construcción de Vivienda en Madera”. Capítulo I. Chile. 55p

C. T. BELLEHUMEUR, M. K. BISARIA AND J. VLACHOPOULOS

1996 “Polymer Eng. Sci., 36(1996)2198.”

DAI, D. y M. FAN.

2014 “Wood fibres as reinforcements in natural fibre composites:structure, properties, processing and applications

Depuravallés S.L. (2017). Polietileno PE. España, Barcelona: Publicación de Depuravallés S.L. <http://www.depuravalles.com/>

D. H. MORTON-JONES,

1991 "Polymer Processing", Chapman & Hall, Londres

DOAK, K. W.

1986 “Ethylene Polymers”. Em: Mark H. M.; Bikales, N. M.; Overberg, C.G.; Menges, G. “Encyclopedia of Polymers Science and Engineering” Volume 6.

DOMINICK ROSATO

1997 "Plastics Processing Data Handbook, 2nd ed. Chapman & Hall, London."

DOUGLAS J. GARDNER & YOUSOO HAN & LU WANG

2015 "Wood-Plastic Composite Technology"

E. HELLMUTH AND B. WUNDERLICH, J.

1965 "Appl. Physics, 36 (1965)3039

ESCOBAR, O.

1993 "Fichas técnicas de las maderas en Colombia, Universidad Nacional de Colombia."

F. HENSEN

1997 "Plastic Extrusion Technology" 2nd ed. Hanser, Munich

FRENKEL, J.

1945 "Viscous flow of crystalline bodies under the action of surface tension" Journal of Physics. Volume 9, pp 386

FROLLINI, E.; LEÃO, A.L.; MATTOSO, L.H.C.

2000 "Natural Polymers and Agrofiber Based Composites, Embrapa Instrumentação Agropecuária, S.Carlos, SP."

GRECO, A. AND A. MAFFEZZOLI

2003 "POLYMER MELTING AND POLYMER POWDER SINTERING BY THERMAL ANALYSIS" Department of Innovation Engineering, University of Lecce, Via Monteroni, 73100 Lecce, Italy

GREEN, D., J. WINANDY y D. KRETSCHMAN

1999 "Mechanical properties of wood." Publicado en Wood Handbook-wood as an engineering material. Madison Wisconsin, USA department of agriculture.

Universidad de Málaga. (2004-2005). Tema 7. Materiales Compuestos. España: Ciencia de los Materiales.

http://webdeptos.uma.es/qicm/Doc_docencia/Tema7_CM.pdf

I.E.S. Villalba Hervás- La madera, 2010, p2.

<https://iesvillalbahervastecnologia.files.wordpress.com/2009/03/la-madera.pdf>

JANIMAK, J. J., MARKEY, L., Y STEVENS, G. C.

2001 “Spherulitic banding in metallocene catalysed polyethylene spherulites”. Polymer, 42(10), 4675–4685.

J. G. RUTIAGA–QUIÑONES; F. E. PEDRAZA–BUCIO; P. LÓPEZ–ALBARRÁN.

2010. “Componentes químicos principales de la madera de Dalbergia granadillo Pittier y de Platymiscium lasiocarpum Sandw” **Main chemical components of Dalbergia granadilloPittier and Platymiscium lasiocarpum Sandw**
Wood

LISPERGUER, M.; SOLÍS, M.

2002 “Compuestos mixtos a base de plasticos y madera. Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Universidad del Bío-Bío; vol11; p.38.”

Plantar - Consorcio Agroforestal. (2008). Especies Forestales. Perú: Plantar Perú.

http://plantarperu.com/especies_capirona.htm

L. M. MATUANA

2015 “The use of wood fibers as reinforcements in composites” Environmental Entomology. Volumen 44, número 3, pp 890-897

L. M. MATUANA

2009 “Recent research developments in wood plastic composites” Journal of Vinyl and additive Technology, Volumen 15, número 3, pp 136-138

MADSEN, D.A.; MADSEN, D. P.

2011 "Print reading for engineering & manufacturing technology. 3rd ed. USA, p.144-145."

MAIER, SILVA M.

1993 "Polímeros, Departamento de Química Orgánica, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, México, pp.1-5.

MALPASS, DENISS B.

2010 "Introduction to Industrial Polyethylene, Catalysts, and Processes, Canada, pp.4-10.

MARKARIAN, J.

2005 "Plastic, Additives and Compounding"

MARKOVICH, N.; M. ARANGUREN y M. REBOREDO

2002 "Some aspects related to the processing of natural fiberpolymer composites. Pp 412-421"

MAT-SHAYUTI, M. M. ABDULLAH

2013 "Water absorption properties and morphology of polypropylene /polycarbonate/ polypropylene-graft-maleic anhydride blends" Volumen 6, número 2 pp 168

MILLER R.

1999. "Structure of Wood. Publicado en Wood Handbook-wood as an engineering material. Madison Wisconsin, USA Department of Agriculture.

MINISTERIO DEL AMBIENTE:

2008 "Informe anual de gestión de residuos sólidos"

MINISTERIO DEL AMBIENTE:

2013 "Informe anual de gestión de residuos sólidos"

M. KONTOPOULOU AND J. VLACHOPOULOS

1999 "Polymer Eng. Sci., 39 (1999)1189."

NEVES, C. J. A.

1999 "Resistencia Química de PE's a varios agentes Químicos-Boletín Técnico n°3"

OKSMAN K, BENGTSSON M.

2007 "Wood Fibre Thermoplastic Composites: Processing, Properties and Future Developments. In: Fakirov S, Bhattacharyya C, editors. Handbook of Engineering Biopolymers: Homopolymers, Blends and Composites. Munich: Carl Hanser Verlag, p. 655-671."

OLAKANMI, E. y M. STRYDOM

2016 "Critical materials and processing challenges affecting the interface and functional performance of wood polymer composites. Materials Chemistry and Physics."

PACHECO, E. B.

2000 "Análisis de impacto ambiental debido a residuos poliméricos. Plástico Moderno, n. 308, p. 40-51"

PETERSON, J. D., VYAZOVKIN, S., Y WIGHT, C. A.

2001 "Kinetics of the Thermal and Thermo-Oxidative Degradation of Polystyrene, Polyethylene and Poly (propylene)". Macromolecular Chemistry and Physics, 202, 775–784.

R.J. CRAWFORD

1998 "Plastics Engineering, 3rd ed., Butterworth-Heinemann, Oxford."

R J CRAWFORD, A G SPENCE, M C CRAMEZ AND M J OLIVEIRA VICE CHANCELLOR'S.

2004. “Queen’s University Belfast, Belfast, Northern Ireland, UK Centro Inc., North Liberty, Iowa, USA Department of Polymer Engineering, Universidad do Minho, Minho, Portugal- Mould pressure control in rotational molding.”

ROSENZWEIG, N. y M. NARKIS

1981 “Sintering Rheology of amorphous Polymers”. Polymer Engineering and Science. Volumen 21. pp.1167 – 1171

SCRIBBEN, E., D. BAIRD y P. WAPPEROM

2006 “Simultaneous cross-linking as a way to control physical growth of random ethylene-polypropylene copolymer during formation of high-impact polypropylene.” Polymer 85. pp 10-19

SIBILLE A.

2006. “Guía de Procesamiento Industrial: Fabricación de muebles con maderas poco conocidas-LKS-Capirona

SIEGMANN, A. I. RAITER, M. NARKIS

1986 “Effect of powder particle morphology on the sintering behaviour of polymers” Department of Materials Engineering and *Department of Chemical Engineering, Technion City, Haifa 3200, Israel

SIERRA, S.

2012 “Estudio de materiales compuestos de matriz polimérica y refuerzos de madera obtenidos a partir de polipropileno y capirona recuperada.” Tesis para optar el grado académico de magister en Ingeniería y Ciencia de los Materiales. Lima. PUCP, Escuela de Posgrado.

SILVA, A. L. N.

1999 “Medición de propiedades térmicas, morfológicas, mecánicas y reológicas de Polietileno y Polipropileno.

SJ. LIU

1998 "Int. Polymer Proc. XIII, Hanser Publishers, Munich, pp. 88–90"

SPEARS, M. A. EDER y M. CARUS

2015 "Wood polymer composites". Publicado en Ansell M.P, Woos Composites, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, Reino Unido. Pp 195-212.

STARK, N.

2001 "Influence of Moisture Absorption on Mechanical Properties of wood Flour-Polypropylene composites". Journal of Thermoplastic composite materials. Vol. 14, número 5, pp 420-431

STARK, N.M.; BERGER, M.J.

1997 "Effect of particle size on properties of wood-flour reinforced composites, p. 134-143."

TIM A. OSSWALD

1998 "Polymer Processing Fundamentals", Hanser Publishers, Munich."

TINO RAMOS, R.

2010 "Materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibra de vidrio. Artículos Técnicos: Técnicas constructivas, pp. 43-45."

VASQUEZ, G.

2014 "Rendimiento de las propiedades físicas de la madera capirona de altura". Revista forestar del peru. Lim, Volumen 7, número 1-2, pp 1-7

WESCHSLERS A., S. HIZIROGLU

2007 "Some properties of wood-plastic composites. Building and Enviroment. Volumen 42, pag. 2638-2644"

YOUNGQUIST, J. A .; KARMAKER, A.C.

1996 "Injection Molding o f Polypropylene reinforced with short jute fibers. Journal of Applied Polymer Science 62, p. 1147-1150"

ZAMPALONI, M., POURBOGHRAT, F., YANKOVICH, S.A., RODGERS, B.N.,
MOORE, J., DRZAL, L.T., MOHANTY, A.K., MISRA, M.

2007 “Kenaf natural fiber reinforced polypropylene composites: a discussion on manufacturing problems and solutions. *Compos. A: Appl. Sci. Manuf.* 38, 1569–1580.”

ZHANG Y. H.

2009 “Studies of surface- modified wood flour/ polypropylene composites”

