

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**ESCUELA DE POSGRADO**



**ESTUDIO DEL SINTERIZADO DE MATERIALES COMPUESTOS DE  
PLÁSTICO RECICLADO Y MADERA RECUPERADA MEDIANTE  
MOLDEO POR COMPRESIÓN**

Tesis para optar el grado de Magíster en Ingeniería y Ciencia de los  
materiales que presenta:

**LUZ ELENA BRAÑEZ HARO**

Asesor:

Dr. Ing. Julio Arnaldo Acosta Sullcahuamán

Miembros del jurado:

Dr. Sci. Juan Carlos Rueda Sánchez

Dr. Ing. Julio Arnaldo Acosta Sullcahuamán

Mg. Walter Mariano Tupia Anticona

Lima, febrero de 2016

## RESUMEN

En las últimas décadas, la industria de los plásticos ha crecido considerablemente con el uso de materiales, tales como el polipropileno y polietileno en la innovación de diversos productos en sectores del envasado, construcción y automovilístico. No obstante, el manejo de los desechos plásticos aún sigue siendo una problemática mundial; ya que, existe un porcentaje de éstos que son depositados en vertederos. Por tanto, la disminución de la contaminación ambiental se ha convertido en un objetivo importante para las entidades gubernamentales, empresas y sociedad en general. De esta manera, se insiste en la implementación de proyectos que disminuyan el impacto ambiental y contribución al desarrollo y progreso del país mediante el reciclaje de residuos plásticos y reutilización de otros desechos.

En esta perspectiva, el objetivo de la presente tesis es el estudio del sinterizado de materiales compuestos fabricados a partir de polipropileno reciclado y partículas de madera capirona recuperadas, empleando el proceso de moldeo por compresión.

La metodología experimental de la investigación consta de cuatro etapas fundamentales: Primeramente, se realizó la caracterización de la materia prima (plástico y madera) de acuerdo a normas ASTM. En segundo lugar, se fabricó un total de 63 muestras (variando la temperatura y tiempo de trabajo) con la finalidad de determinar los parámetros de sinterizado para la fabricación del material compuesto. Posteriormente, se fabricó 45 muestras del material compuesto sinterizado manteniendo la temperatura y tiempo de trabajo constantes con la variación del contenido y tamaño de partícula de madera. Finalmente, se fabricaron probetas que se utilizaron en los ensayos de flexión, tracción, impacto, densidad y absorción de agua según normas ASTM, y se realizó un análisis térmico de los compuestos que demostraron mejores propiedades mecánicas; así como el análisis morfológico con un microscopio electrónico de barrido (SEM) en la rotura de la probeta después de los ensayos mecánicos.

A partir del estudio del proceso de sinterizado de los materiales compuestos fabricados con polipropileno reciclado y partículas de madera capirona mediante el moldeo por compresión, se determinó que, para una misma proporción y tamaño de partícula de madera, las propiedades mecánicas en geometría de flexión se incrementan a mayor temperatura de trabajo y, de manera similar, también se incrementa con el tiempo hasta un máximo para luego disminuir con tiempos excesivos.



## DEDICATORIA

Dedico esta tesis a Dios por brindarme la fuerza necesaria para cumplir con este objetivo.

A mi papá, mamá y hermana.

A mi profesor Julio Acosta.

A la luz que permanece viva y al caluroso sol que aún se deja ver.

## AGRADECIMIENTOS

A FONDECYT en virtud del convenio N° 012–2013-FONDECYT por el financiamiento de los estudios de la maestría de Ingeniería y Ciencia de los Materiales en la Pontificia Universidad Católica del Perú.

A FINCyT (ahora Innovate Perú) por el financiamiento del proyecto de investigación en convenio N° 201-FINCyT-IA-2013.

A la Pontificia Universidad Católica del Perú por su plana docente de alta calidad y por su infraestructura.

A mi asesor, Dr. Ing. Julio Acosta, por la paciencia, inspiración y motivación.

A mis profesores de la maestría por todo el conocimiento brindado en cada uno de los cursos.

A mis padres José Brañez y Gladys Haro, quienes siempre me han extendido la mano para apoyarme.

A mi hermana y cuñado por su apoyo y sus palabras de ánimo en todo momento.

A mi familia entera por la paciencia y comprensión.

A mis compañeros de clases de la maestría, mis MATERIALITOS, por los días de aprendizaje y grandes experiencias: Anto, Ali, Adán, Malo, David, Merlyn, Aissa, Mari y José físico. Agradezco especialmente a Sol, Angie, José triste, Andoni y George por su apoyo en mi tesis.

A las personas que me apoyaron con el uso de los equipos de los Laboratorios de Manufactura y Materiales de la sección de Ingeniería mecánica. Al Ing. Aníbal Rosas, Ing. Jorge Fernández, a los analistas Carlos Romero, Carlos Juarez, Paulo Muñante y Vanessa.

A todos mis compañeros que apoyan los trabajos de investigación del laboratorio 04: Mario, Daniel, Rosita y Dieguito.

A mis amigos fullbodiadores por su apoyo incondicional: Verito y Juan.

Às pessoas maravilhosas que Deus colocou na minha vida e que têm me ensinado o verdadeiro sentido da vida.

Pero sobre todo a Dios por la salud y fuerza para conseguir que esta investigación pueda ser concluida.

## ÍNDICE GENERAL

### CAPÍTULO I FUNDAMENTOS TEÓRICOS

	Pág.
1.1	Impacto ambiental del reciclaje de residuos sólidos en el Perú ..... 5
1.2	Los materiales compuestos..... 6
1.3	Materiales compuestos de matriz polimérica y madera ..... 7
1.4	El polipropileno (PP) ..... 7
1.5	La madera.....10
1.5.1	Estructura biológica de la madera .....11
1.5.2	La madera capirona (MC) .....14
1.6	Procesos de manufactura de los CPM .....17
1.6.1	Extrusión.....17
1.6.2	Inyección.....19
1.6.3	Moldeo por compresión.....20
1.6.4	Parámetros que influyen en la fabricación de los CPM .....21
1.7	Tratamientos químicos utilizados en la elaboración de CPM.....22
1.8	Sinterizado de los polímeros .....23
1.8.1	Etapas del sinterizado .....24
1.8.2	Estudio de sinterizado en la elaboración de CPM .....26
1.8.3	Métodos de análisis del sinterizado.....27
1.9	Aplicaciones de los materiales compuestos de plástico y madera.....28

### CAPÍTULO II METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1	Materiales .....32
2.1.1	Partículas de madera capirona.....32
2.1.2	Partículas de plástico .....33
2.2	Caracterización de la madera capirona .....34
2.2.1	Equipos e instrumentos empleados.....34
2.2.2	Determinación de la densidad de la madera .....38
2.2.3	Determinación del contenido de humedad de la madera.....39

2.2.4	Ensayo de absorción de agua de la madera .....	40
2.2.5	Análisis termogravimétrico (TGA) de la madera .....	42
2.3	Caracterización del polipropileno virgen y reciclado .....	42
2.3.1	Equipos empleados.....	42
2.3.2	Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR-ATR) .....	44
2.3.3	Índice de fluidez (IFM).....	44
2.3.4	Calorimetría diferencial de barrido (DSC):.....	45
2.3.5	Análisis termogravimétrico (TGA).....	46
2.4	Diseño experimental .....	46
2.5	Fabricación de muestras del material compuesto a partir de polipropileno y partículas de madera capirona .....	47
2.5.1	Equipos empleados.....	47
2.5.2	Determinación de la cantidad de partículas de madera capirona y plástico: 53	
2.5.3	Selección y pesaje de partículas de MC y PP .....	54
2.5.4	Mezclado y homogenizado de partículas de MC recuperada y PP reciclado.....	55
2.5.5	Limpieza del molde y aplicación del desmoldante .....	55
2.5.6	Pre calentamiento del molde.....	55
2.5.7	Carga de la mezcla en el molde pre calentado.....	56
2.5.8	Calentamiento a la temperatura de trabajo de la mezcla.....	57
2.5.9	Prensado y enfriamiento del molde .....	58
2.5.10	Extracción de la muestra del molde .....	58
2.5.11	Rotulado de muestras .....	59
2.6	Fabricación de las probetas de las muestras obtenidas del material compuesto .....	60
2.6.1	Equipos y herramientas.....	60
2.6.2	Procedimiento de corte de las muestras del material compuesto .....	62
2.6.3	Procedimiento de fabricación de probetas para el ensayo de flexión .....	64
2.6.4	Procedimiento para la fabricación de probetas para el ensayo de tracción	66

2.6.5	Procedimiento de fabricación de probetas para el ensayo de impacto Charpy	67
2.7	Realización de los ensayos mecánicos y físicos del material compuesto: ....	69
2.7.1	Equipos empleados:.....	69
2.7.2	Ensayo de flexión.....	71
2.7.3	Ensayo de tracción.....	72
2.7.4	Ensayo de impacto Charpy .....	74
2.7.5	Ensayo de densidad del material compuesto .....	75
2.7.6	Ensayo de absorción de agua del material compuesto .....	76
2.8	Caracterización del material compuesto.....	77
2.8.1	Equipos empleados.....	77
2.8.2	Análisis morfológico del material compuesto:.....	79
<b>CAPÍTULO III</b>		
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>		
3.1	Caracterización de la madera capirona .....	80
3.1.1	Densidad de la madera capirona ( $\rho_{MC}$ ).....	81
3.1.2	Contenido de humedad de la madera ( $\%H_{MC}$ ).....	82
3.1.3	Absorción de agua de la madera ( $\%A_{MC}$ ) .....	84
3.1.4	Análisis termogravimétrico de la madera.....	85
3.1.5	Resultados de la caracterización de la madera capirona.....	87
3.2	Caracterización del polipropileno virgen y reciclado .....	87
3.2.1	Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier.....	88
3.2.2	Índice de fluidez (MFI).....	89
3.2.3	Análisis térmico del plástico .....	90
3.3	Determinación de los parámetros de trabajo involucrados en la fabricación del material compuesto sinterizado de polipropileno y partículas de madera capirona .....	95
a.	Tamaño y cantidad de partículas de madera.....	96
b.	Presión ejercida, tiempo de prensado y enfriamiento .....	97
c.	Temperatura y tiempo de trabajo .....	98

d.	Sinterizado del material compuesto.....	99
3.4	Resultados y discusión de los ensayos mecánicos, físicos y térmicos del material compuesto.....	110
3.4.1	Ensayo de flexión.....	110
3.4.2	Ensayo de tracción.....	118
3.4.3	Ensayo de impacto Charpy .....	128
3.4.4	Ensayo de densidad.....	131
3.4.5	Ensayo de absorción de agua.....	135
3.4.6	Análisis térmico.....	139
3.5	Análisis morfológico del material compuesto.....	143
	CONCLUSIONES.....	145
	BIBLIOGRAFÍA.....	147



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1</b> Propiedades mecánicas en ensayo de tracción y resistencia al impacto (Adaptado de Fernandes 2007) .....	10
<b>Tabla 1.2</b> Propiedades mecánicas de la MC (Adaptado de Escobar 1993) .....	16
<b>Tabla 1.3</b> Propiedades físicas de la MC (Adaptado de Escobar 1993) .....	16
<b>Tabla 1.4</b> Resumen de aplicaciones de CPM (Eder 2013, Youngquist 1999) .....	30
<b>Tabla 2.1</b> Características de la capirona (Smith 2012) .....	33
<b>Tabla 2.2</b> Principales propiedades del polipropileno PROPILCO 02H84ND ( <i>datos proporcionados por ALUSUD PERÚ S.A. - Anexo 1</i> ) .....	34
<b>Tabla 2.3</b> Características de las mallas utilizadas en la tamización de la madera ..	35
<b>Tabla 2.4</b> Parámetros de ensayo para el DSC .....	46
<b>Tabla 2.5</b> Cantidad de muestras totales para el ensayo de moldeo del CPM ( <i>Parte I</i> ) .....	47
<b>Tabla 2.6</b> Cantidad de muestras a fabricar del material compuesto ( <i>Parte II</i> ).....	47
<b>Tabla 2.7</b> Características generales del horno .....	48
<b>Tabla 2.8</b> Determinación del peso de la madera y polipropileno para la muestra ...	54
<b>Tabla 2.9</b> Probetas y ensayos realizados según normas ASTM .....	60
<b>Tabla 3.1</b> Resultados de la caracterización de la capirona (Smith, 2012) .....	80
<b>Tabla 3.2</b> Densidad de diversas muestras de madera capirona .....	81
<b>Tabla 3.3</b> Valores de densidad de la madera capirona de diversas investigaciones .....	82
<b>Tabla 3.4</b> Humedad relativa vs. Contenido de humedad de la madera.....	82
<b>Tabla 3.5</b> Contenido de humedad de diversas muestras de madera capirona.....	83
<b>Tabla 3.6</b> Contenido de absorción de agua de diversas muestras de capirona .....	84
<b>Tabla 3.7</b> Resultados de la caracterización de la madera capirona .....	87
<b>Tabla 3.8</b> Bandas características representativas del PPR y PP-virgen .....	89
<b>Tabla 3.9</b> Resultados del ensayo de MFI del PP-virgen .....	90
<b>Tabla 3.10</b> Resultados del ensayo de MFI del PPR.....	90
<b>Tabla 3.11</b> La influencia del MFI en otras propiedades .....	90
<b>Tabla 3.12</b> Resumen del análisis TGA .....	92
<b>Tabla 3.13</b> Resumen del análisis de DSC .....	95
<b>Tabla 3.14</b> Variables involucradas en el proceso de fabricación del CPM .....	96
<b>Tabla 3.15</b> Parámetros constantes del proceso de fabricación de CPM ( <i>Parte I</i> ) ...	97
<b>Tabla 3.16</b> Cantidad de muestras obtenidas del material compuesto ( <i>Parte I</i> ) .....	98

<b>Tabla 3.17</b> Resistencia y módulo en flexión del CPM (70%PP-30%MR2) a 190 °C .....	102
<b>Tabla 3.18</b> Resistencia y módulo en flexión del CPM (70%PP-30%MR2) a 180 °C .....	103
<b>Tabla 3.19</b> Resistencia y módulo en flexión del CPM (70%PP-30%MR2) a 175 °C .....	103
<b>Tabla 3.20</b> Resistencia y módulo en flexión del CPM (70%PP-30%MR2) a 170 °C .....	103
<b>Tabla 3.21</b> Condiciones de trabajo para la fabricación de CPM de PPR y MC .....	109
<b>Tabla 3.22</b> Variables a evaluar de los diversos ensayos realizados al CPM.....	110
<b>Tabla 3.23</b> Bandas características representativas de la madera capirona .....	111
<b>Tabla 3.24</b> Bandas características del material compuesto .....	111
<b>Tabla 3.25</b> Resultados de resistencia a la flexión del CPM .....	114
<b>Tabla 3.26</b> Resultados del módulo de elasticidad en flexión del CPM .....	117
<b>Tabla 3.27</b> Resistencia y módulo elástico en flexión de la capirona (Smith, 2012)	118
<b>Tabla 3.28</b> Resultados de resistencia a la tracción del CPM .....	124
<b>Tabla 3.29</b> Resultados del módulo elástico en tracción del CPM.....	125
<b>Tabla 3.30</b> Resultados de la resistencia al impacto del CPM .....	130
<b>Tabla 3.31</b> La influencia de la densidad en otras propiedades .....	131
<b>Tabla 3.32</b> Resultados de densidad promedio para los diversos contenidos y tamaños de partículas de MC .....	134
<b>Tabla 3.33</b> Resultados de absorción de agua promedio (%A <sub>CPM PROM</sub> ) para los diversos contenidos y tamaños de partículas de MC .....	138
<b>Tabla 3.34</b> Resultados del análisis de TGA para el material compuesto .....	141
<b>Tabla 3.35</b> Resultados del análisis de DSC para el material compuesto .....	142

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b> Estructura de la madera dura y blanda (Kuklic 2008) .....	11
<b>Figura 1.2.</b> Estructura macroscópica del tronco .....	13
<b>Figura 1.3.</b> Estructura microscópica de la madera, a) tronco de madera, b) estructura molecular de la pared celular, c) arreglo a nivel nanométrico (Adaptado de Dai 2014; Olakanmi 2016) .....	13
<b>Figura 1.4.</b> Tres ejes principales de la madera (Adaptado de Green 1999).....	14
<b>Figura 1.5.</b> Locación geográfica de 7 proveniencias de <i>Calycophyllum spruceanum</i> en la zona de Aguaytía, Amazonía de Perú (Adaptado de Montes 2008) .....	15
<b>Figura 1.6.</b> Esquema del moldeo por extrusión (Dai 2014).....	18
<b>Figura 1.7.</b> a) Pellets de polipropileno con un 80% de polvo de madera, b) perfiles macizos, c) dos perfiles con diferente textura de madera, d) núcleo de espuma de baja densidad (espuma) para perfiles (Adaptado de Spear 2015) .....	19
<b>Figura 1.8.</b> Masetas diseñadas por inyección (Adaptado de Spear 2015).....	19
<b>Figura 1.9.</b> Esquema del proceso de inyección (Dai 2014) .....	20
<b>Figura 1.10.</b> a) Esquema de moldeo por compresión, b) productos. (Dai 2014) .....	20
<b>Figura 1.11.</b> Micrografía óptica de partículas poliméricas de poliestireno antes y a 200°C (Adaptado de Siegmann 1986) .....	24
<b>Figura 1.12.</b> Evolución de la forma durante la coalescencia de dos partículas esféricas (Adaptado de Scribber 2006) .....	25
<b>Figura 1.13.</b> Micrografía óptica de a coalescencia de gotas de polipropileno (Scribber 2006) .....	25
<b>Figura 1.14.</b> Evolución de la temperatura del aire que rodea al molde (curva H), del molde (curva X) y del interior del molde (curva Y) durante el proceso de moldeo y las etapas durante el ciclo (Adaptado de Beltran 2012).....	27
<b>Figura 1.15.</b> Colgadores de ropa elaborados por compresión (Youngquist 1999) ..	29
<b>Figura 1.16.</b> CPM con a) partículas, y b) fibras (Youngquist 1999) .....	29
<b>Figura 1.17.</b> Aplicación en el exterior del CPM (Clemons 2007).....	31
<b>Figura 2.1.</b> Madera capirona: a) residuos recuperados, b) partículas clasificadas con la malla MR2.....	32
<b>Figura 2.2.</b> Polipropileno reciclado: a) tapa roscas, b) partículas .....	33
<b>Figura 2.3.</b> a) Sistema de clasificación de tamaños de partículas, b) tamiz MR2 ...	35
<b>Figura 2.4.</b> a) Balanza analítica b) balanza y accesorios.....	35


<b>Figura 2.5.</b> a) Mufla eléctrica, b) desecador .....	36
<b>Figura 2.6.</b> a) Vaso de precipitado b) termómetro .....	37
<b>Figura 2.7.</b> Máquina TGA-IR (lado derecho) .....	37
<b>Figura 2.8.</b> Proceso para la determinación de la densidad de la madera. ....	39
<b>Figura 2.9.</b> Proceso para la determinación del contenido de humedad de la MC:..	40
<b>Figura 2.10.</b> Proceso seguido para el ensayo de absorción de agua de la MC .....	41
<b>Figura 2.11.</b> Equipo FTIR-ATR.....	42
<b>Figura 2.12.</b> a) Equipo del IFM b) accesorios del equipo.....	43
<b>Figura 2.13.</b> Máquina DSC.....	43
<b>Figura 2.14.</b> Proceso para el ensayo de FTIR-ATR del PP .....	44
<b>Figura 2.15.</b> Proceso para la determinación del índice de fluidez del PP .....	45
<b>Figura 2.16.</b> a) Parte externa del horno b) parte interna del horno .....	48
<b>Figura 2.17.</b> Prensa hidráulica .....	49
<b>Figura 2.18.</b> a) “Molde A” con la placa de extracción, b) Tapa del “molde A” .....	50
<b>Figura 2.19.</b> a) “Molde B” con la placa de extracción, b) Tapa del “molde B” .....	50
<b>Figura 2.20.</b> Sensor de temperatura.....	51
<b>Figura 2.21.</b> Vista de perfil del molde B:se observa la posición de la termocupla...51	
<b>Figura 2.22.</b> Sistema de extracción .....	52
<b>Figura 2.23.</b> Sistema de transporte de molde.....	52
<b>Figura 2.24.</b> a) Desmoldante b) limpiador del molde .....	53
<b>Figura 2.25.</b> a) Pesaje de la capirona, b) pesaje del polipropileno reciclado .....	54
<b>Figura 2.26.</b> a) Inicio del mezclado, b) Mezcla homogénea.....	55
<b>Figura 2.27.</b> Aplicación del desmoldante.....	55
<b>Figura 2.28.</b> a) Colocación de las termocuplas, b) Ingreso del molde al horno.....56	
<b>Figura 2.29.</b> a) Colocación de la mezcla, b) mezcla homogénea en el molde .....	56
<b>Figura 2.30.</b> a) Colocación de la tapa del molde, b) retiro de las asas de la tapa...57	
<b>Figura 2.31.</b> Traslado del molde hacia el horno .....	57
<b>Figura 2.32.</b> Ingreso al horno del molde con la mezcla de plástico y madera.....57	
<b>Figura 2.33.</b> Inicio del prensado .....	58
<b>Figura 2.34.</b> Extracción de la muestra.....	58
<b>Figura 2.35.</b> a) Muestra del CPM final, b) grupo de muestras rotuladas.....59	
<b>Figura 2.36.</b> Sierra de cinta.....	60
<b>Figura 2.37.</b> Centro de mecanizado vertical con control numérico .....	61
<b>Figura 2.38.</b> a) Fresadora de entalla, b) vernier digital .....	62
<b>Figura 2.39.</b> Distribución de las probetas de flexión (a y b) para las muestras obtenidas en la “ <i>Parte Experimental I</i> ” .....	63

<b>Figura 2.40.</b> Distribución de las probetas para las muestras obtenidas en la “ <i>Parte Experimental II</i> ”: a) Probetas de impacto, b) probeta de flexión, c) probeta de tracción .....	63
<b>Figura 2.41.</b> Probetas de la <i>Parte experimental I</i> : a) corte mediante la sierra de cinta, b) Probetas de flexión después del corte.....	63
<b>Figura 2.42.</b> Probetas de la <i>Parte experimental II</i> : a) corte mediante la sierra de cinta de la sección para la probeta de impacto, b) corte de la sección para la probeta de tracción .....	64
<b>Figura 2.43.</b> Secciones cortadas para las probetas de la <i>Parte II</i> .....	64
<b>Figura 2.44.</b> Dimensiones de la probeta de flexión según ASTM D 1037 – 06a .....	65
<b>Figura 2.45.</b> Proceso de fabricación de las probetas de flexión.....	65
<b>Figura 2.46.</b> Dimensiones de la probeta de tracción de acuerdo a la norma ASTM D 1037 – 06a.....	66
<b>Figura 2.47.</b> Proceso seguido para la fabricación de las probetas de tracción .....	67
<b>Figura 2.48.</b> Dimensiones de la probeta de impacto de acuerdo a la norma ASTM D 6110 – 05a.....	68
<b>Figura 2.49.</b> Proceso seguido durante la fabricación de las probetas de impacto ..	68
<b>Figura 2.50.</b> a) Máquina de ensayo universal Zwick/Roell Z050, b) mordazas .....	69
<b>Figura 2.51.</b> a) Máquina de ensayo universal Zwick/Roell Z050, b) cabezal y bloques de apoyo .....	70
<b>Figura 2.52.</b> Máquina de impacto Zwick/Roell HIT25P .....	70
<b>Figura 2.53.</b> a) Inicio del ensayo de flexión de una probeta según la norma ASTM D 1037, b) máxima deformación del material compuesto .....	71
<b>Figura 2.54.</b> a) Inicio del ensayo de flexión de una probeta de PPR, b) máxima deformación.....	71
<b>Figura 2.55.</b> a) Inicio del ensayo de tracción del CPM, b) rotura de la probeta.....	73
<b>Figura 2.56.</b> a) Inicio del ensayo de tracción del PPR, b) rotura de la probeta .....	73
<b>Figura 2.57.</b> Ensayo de impacto según ASTM D 6110 – 05a .....	75
<b>Figura 2.58.</b> a) Probeta de impacto ensayada, b) rotura de la probeta de impacto.	74
<b>Figura 2.59.</b> Proceso para la determinación de la densidad del material compuesto .....	76
<b>Figura 2.60.</b> Proceso para determinar la cantidad de agua absorbida en el CPM durante 24 h .....	77
<b>Figura 2.61.</b> Estereocopio óptico conectado a una PC.....	78
<b>Figura 2.62.</b> Microscopio electrónico de barrido (SEM) .....	78
<b>Figura 2.63.</b> Proceso para analizar la adhesión de las partículas de PPR-MC:.....	79

<b>Figura 3.1.</b> Curva termogravimétrica de la madera capirona .....	86
<b>Figura 3.2.</b> Termograma diferencial de la madera capirona .....	86
<b>Figura 3.3.</b> Espectros FTIR-ATR del PP virgen y reciclado .....	88
<b>Figura 3.4.</b> Curva termogravimétrica del PPR y PP-virgen .....	91
<b>Figura 3.5.</b> Termograma diferencial del PPR y PP-virgen .....	92
<b>Figura 3.6.</b> Diagrama DSC del PPR-enfriamiento .....	94
<b>Figura 3.7.</b> Diagrama DSC del PPR-segundo calentamiento .....	94
<b>Figura 3.8.</b> Cantidad de partículas obtenidas en un costal: MR1≤5,15 mm; MR2≤ 3,33 mm, MR3≤ 1,9 mm; MR4≤ 0,98 y MR5≤ 0,48 mm. ....	96
<b>Figura 3.9.</b> Muestras del CPM a) Sin presión ejercida b) con poca presión ejercida .....	99
<b>Figura 3.10.</b> Muestras del CPM a $T_w=190\text{ °C}$ y $t_w=10\text{ min}$ a) superficialmente hay sinterizado b) internamente se observa que el proceso de sinterizado no ha concluido .....	100
<b>Figura 3.11.</b> Esquema del proceso de sinterizado: se puede observar en la sección transversal que en la parte superior e inferior ha empezado el proceso de sinterizado incluso a $t_w=10\text{ min}$ pero las partículas de PPR y MC continúan intactas en el centro. Por lo tanto, el proceso de sinterizado culmina en 40 min.....	101
<b>Figura 3.12.</b> Muestras del CPM a) $T_w=170\text{ °C}$ y $t_w=50\text{ min}$ b) partículas intactas	101
<b>Figura 3.13.</b> Muestras del CPM con $T_w=180\text{ °C}$ y $t_w=20\text{ min}$ a) el proceso de sinterizado no ha terminado b) internamente las partículas están sólidas .....	102
<b>Figura 3.14.</b> Resistencia a la flexión en función del $t_w$ del CPM .....	104
<b>Figura 3.15.</b> Módulo elástico en flexión en función del $t_w$ del CPM.....	104
<b>Figura 3.16.</b> Termograma TGA de la capirona a $T_w=190\text{ °C}$ constante.....	106
<b>Figura 3.17.</b> Micrografía SEM de la superficie fracturada a partir del ensayo de flexión del CPM con proporción 70%PP-30%MC a una $T_w$ de $190\text{ °C}$ y un $t_w$ de 30 min.....	107
<b>Figura 3.18.</b> Micrografía SEM de la superficie fracturada a partir del ensayo de flexión del CPM con proporción 70%PP-30%MC a una $T_w$ de $190\text{ °C}$ y un $t_w$ de 60 min.....	108
<b>Figura 3.19.</b> Micrografía SEM de la superficie fracturada a partir del ensayo de flexión del CPM con proporción 70%PP-30%MC a una $T_w$ de $190\text{ °C}$ y un $t_w$ de 40 min.....	108

<b>Figura 3.20.</b> Micrografía SEM de la superficie fracturada a partir del ensayo de flexión del CPM con proporción 70%PP-30%MC a una $T_w$ de 190°C y un $t_w$ de 50 min.....	109
<b>Figura 3.21.</b> Resistencia a la flexión vs. %Cantidad de madera capirona tamaño MR2 ( $\leq 3,33$ mm): se observa la dispersión de valores y la tendencia de estos.....	112
<b>Figura 3.22.</b> Resistencia a la flexión vs. %cantidad de madera capirona tamaño MR2 ( $\leq 3,33$ mm): se observa que la resistencia a la flexión disminuye al aumentar la cantidad de madera.....	112
<b>Figura 3.23.</b> Espectro del material compuesto y de la materia prima por separado. ....	113
<b>Figura 3.24.</b> Resistencia a la flexión vs. Tamaño de partícula de capirona: se observa que la resistencia a la flexión disminuye al aumentar la cantidad de madera, pero no se observa variación significativa al disminuir el tamaño de partícula. Los tamaños de partícula de madera son: MR1 $\leq 5,15$ mm, MR2 $\leq 3,33$ mm y MR3 $\leq 1,90$ mm.....	115
<b>Figura 3.25.</b> Módulo elástico en flexión vs. %Cantidad de madera capirona tamaño MR1 ( $\leq 5,15$ mm): Se observan la dispersión de valores obtenidos en el ensayo y la tendencia de éstos.....	116
<b>Figura 3.26.</b> Módulo elástico promedio en flexión vs. %Cantidad de madera capirona tamaño MR1 ( $\leq 5,15$ mm).....	116
<b>Figura 3.27.</b> Módulo elástico en flexión vs. Tamaño de partícula de capirona (MR1 $\leq 5,15$ mm, MR2 $\leq 3,33$ mm y MR3 $\leq 1,90$ mm). El módulo elástico no se ve afectado significativamente por el tamaño de partícula de madera. ....	117
<b>Figura 3.28.</b> Imágenes en el estereoscopio para observar los poros en la sección transversal de las probetas de tracción del CPM para partículas menores iguales a 5,15 mm (MR1) con una proporción de 30% de capirona.....	119
<b>Figura 3.29.</b> Imágenes en el estereoscopio para observar los de poros en la sección transversal de las probetas de tracción del CPM para partículas menores iguales a 3,33 mm (MR2) con una proporción de 30% de capirona.....	120
<b>Figura 3.30.</b> Imágenes en el estereoscopio para observar los poros en la sección transversal de las probetas de tracción del CPM para partículas menores iguales a 1,9 mm (MR3) con una proporción de 30% de capirona.....	121

- Figura 3.31.** Resistencia a la tracción vs. %cantidad de madera capirona tamaño MR1 ( $\leq 5,15$  mm): se observan la dispersión de valores obtenidos en el ensayo y la tendencia de éstos..... 122
- Figura 3.32.** Resistencia a la tracción vs. %cantidad de madera capirona tamaño MR1 ( $\leq 5,15$  mm): se observa que la resistencia a la tracción disminuye al aumentar la cantidad de madera..... 123
- Figura 3.33.** Resistencia a la tracción vs. Tamaño de partícula de capirona: se observa que la resistencia a la tracción disminuye al aumentar la cantidad de madera y aumenta al disminuir el tamaño de partícula. Los tamaños de partícula de madera utilizados son: MR1  $\leq 5,15$  mm, MR2  $\leq 3,33$  mm y MR3  $\leq 1,90$  mm..... 124
- Figura 3.34.** Módulo elástico promedio en tracción vs. %Cantidad de madera capirona tamaño MR1 ( $\leq 5,15$  mm)..... 126
- Figura 3.35.** Módulo elástico promedio en tracción vs. %Cantidad de madera capirona tamaño MR2 ( $\leq 3,33$  mm)..... 126
- Figura 3.36.** Módulo elástico promedio en tracción vs. %Cantidad de madera capirona tamaño MR3 ( $\leq 1,9$  mm). ..... 127
- Figura 3.37.** Módulo elástico en tracción vs. Tamaño de partícula de capirona (MR1  $\leq 5,15$  mm, MR2  $\leq 3,33$  mm y MR3  $\leq 1,90$  mm). El módulo elástico no se ve afectado significativamente por el tamaño de partícula de madera. .... 127
- Figura 3.38.** Resistencia al impacto vs. %cantidad de madera capirona tamaño MR1 ( $\leq 5,15$  mm): se observa que la resistencia disminuye al aumentar la cantidad de madera. .... 128
- Figura 3.39.** Resistencia al impacto vs. %cantidad de madera capirona tamaño MR2 ( $\leq 3,33$  mm): la resistencia disminuye al aumentar la cantidad de madera. .... 129
- Figura 3.40.** Resistencia al impacto vs. %cantidad de madera capirona tamaño MR3 ( $\leq 1,9$  mm): se observa que la resistencia disminuye al aumentar la cantidad de madera. .... 129
- Figura 3.41.** Resistencia al impacto vs. Tamaño de partícula de capirona (MR1  $\leq 5,15$  mm, MR2  $\leq 3,33$  mm y MR3  $\leq 1,90$  mm). La resistencia al impacto se incrementa conforme se disminuye el tamaño de partícula y disminuye al aumentar la cantidad de madera..... 130
- Figura 3.42.** Densidad vs. %Cantidad de madera capirona tamaño MR1: Se observan la dispersión de valores obtenidos en el ensayo y la tendencia de éstos..... 133

<b>Figura 3.43.</b> Densidad vs. %Cantidad de madera capirona tamaño MR1 .....	133
<b>Figura 3.44.</b> Densidad vs. Tamaño de partícula capirona (MR1 $\leq 5,15$ mm, MR2 $\leq 3,33$ mm y MR3 $\leq 1,90$ mm). Se muestran las barras de error correspondientes a la desviación estándar. ....	134
<b>Figura 3.45.</b> Absorción de agua vs. %Cantidad de madera capirona tamaño MR1. ....	136
<b>Figura 3.46.</b> Absorción de agua vs. %Cantidad de madera capirona tamaño MR1 .....	137
<b>Figura 3.47.</b> Absorción de agua vs. Tamaño de partícula capirona, se muestran las barras de error correspondientes a la desviación estándar .....	137
<b>Figura 3.48.</b> Absorción de agua vs. Tiempo .....	139
<b>Figura 3.49.</b> Curvas termogravimétricas de los materiales puros y de los compuestos .....	140
<b>Figura 3.50.</b> Termogramas diferenciales de los materiales puros y de los compuestos .....	140
<b>Figura 3.51.</b> Diagrama DSC del PPR-enfriamiento .....	141
<b>Figura 3.52.</b> Diagrama DSC del PPR-segundo calentamiento .....	142
<b>Figura 3.53.</b> Característica morfológica del CPM con proporción 70%PP-30%MC y partícula de madera $\leq 1,90$ mm (MR3) a una $T_w$ de $190^\circ\text{C}$ y un $t_w$ de 50 min.  : Partículas de madera embebidas por el plástico que presenta una buena adhesión. ....	143
<b>Figura 3.54.</b> Imagen a 20X de una fractura de tracción del CPM con proporción 70%PP-30%MC MR3 a una $T_w$ de $190^\circ\text{C}$ y un $t_w$ de 50 min (mezcla medianamente homogénea). ....	144

## INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población, los cambios culturales en los hábitos de consumo y la demanda de productos fabricados con termoplásticos ha incrementado continuamente la generación de residuos a nivel mundial. En el Perú, un estudio realizado, en el 2011 por el MINAM (Ministerio del Ambiente del Perú), indica que los residuos sólidos de la población urbana alcanzaron las cifras de 7,2 millones de toneladas en un año, de los cuales 4,1 millones de toneladas de residuos sólidos son destinados a rellenos sanitarios. De estas cantidades el 11% son productos plásticos, por lo que puede reciclarse aproximadamente 0,25 millones de toneladas al año (MINAM, 2011).

Si bien es cierto, la fabricación de algunos productos exige altos estándares de calidad que incluso requieren del uso de algún termoplástico virgen, existen otros tipos de aplicaciones para utilizar plástico reciclado, por lo cual es importante encontrar un proceso con determinados parámetros que permitan aprovechar estos desechos y, así, reducir el impacto ambiental. Como una solución a esta problemática, durante los últimos años, el desarrollo en el estudio de materiales compuestos de plástico y madera (WPC: *Wood Plastic Composites*) y la fabricación de estos bajo diversos procesos (tales como la extrusión, inyección, moldeo por compresión, moldeo rotacional, etc) ha aumentado para diversas aplicaciones.

En este sentido, la Pontificia Universidad Católica del Perú realiza proyectos en la línea de investigación de los materiales compuestos de madera y plástico (WPC), el cual tiene la finalidad de elaborar nuevos materiales a partir de plástico reciclado y madera recuperada, denominados "Qauchu Kullu", y así encontrar un compuesto con propiedades requeridas dentro de estándares para ser utilizarlo en la fabricación de productos a bajo costo de producción, además de colaborar con la preservación del medio ambiente.

La presente investigación espera obtener un material compuesto mediante moldeo por compresión, a partir de polipropileno reciclado y madera capirona recuperada, a temperaturas cercanas al punto de fusión del plástico, generando un ahorro de energía comparado con otros procesos; a su vez el uso de materiales reciclados y recuperados permite un ahorro económico en materia prima. De esta manera, a causa de la actual demanda de materiales con elevados costos, se busca fomentar la utilización de materiales lignocelulósicos recuperados como refuerzo de los compuestos de matriz polimérica para determinadas aplicaciones que reduzcan el

costo de producción y, además, cuenten con mayor rigidez y resistencia a los rayos ultravioletas que los plásticos; así como mejor resistencia a las termitas y menor absorción de humedad que la madera.

El objetivo general de esta tesis es el estudio del sinterizado de materiales compuestos de matriz termoplástica reciclada y partículas de madera recuperadas, utilizando el proceso de moldeo por compresión.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Investigar el estado de la tecnología relacionado con los materiales compuestos de madera y plástico.
- Establecer la metodología experimental para la investigación. Dentro de la cual es importante el diseño experimental que considera las variables involucradas en el proceso de sinterizado para la fabricación del material compuesto.
- Caracterizar los constituyentes (plástico y madera) que integrarán el material compuesto, mediante ensayos normalizados.
- Realizar pruebas de moldeo por compresión para determinar los parámetros del proceso de sinterizado de muestras planas rectangulares, de acuerdo al diseño experimental, variando principalmente el contenido y tamaño de la partícula de la madera.
- Fabricar probetas para la caracterización de los materiales compuestos obtenidos mediante las pruebas de moldeo por compresión.
- Evaluar las diferentes propiedades físicas, principalmente las térmicas y mecánicas, del material compuesto mediante ensayos normalizados.
- Analizar y discutir los resultados.

En consecuencia, se espera encontrar las mejores condiciones del proceso de sinterizado del material compuesto fabricado mediante moldeo por compresión y el efecto que produce la variación del contenido y tamaño de partícula de madera en las propiedades físicas y mecánicas del compuesto. A continuación, se presenta la estructura de la tesis:

**Capítulo I:** El propósito de este capítulo es presentar un estudio sobre los residuos sólidos en el Perú, los fundamentos teóricos sobre los materiales involucrados

(materiales compuestos, polipropileno y madera capirona), los procesos de fabricación más comunes de materiales compuestos y sus respectivas aplicaciones.

**Capítulo II:** El enfoque de este capítulo consiste en desarrollar la metodología experimental de la tesis, así como explicar los procedimientos seguidos en cuanto a la caracterización de la materia prima (madera y plástico), la fabricación de las muestras y probetas de los materiales compuestos sinterizados y la ejecución de los ensayos de acuerdo a normas ASTM.

**Capítulo III:** Este capítulo presenta los resultados obtenidos y, a su vez, se realiza un análisis y discusión de los mismos.

Finalmente, se presenta las conclusiones obtenidas a partir del análisis de los resultados del material compuesto sinterizado.





*“A ciência precisa de tempo para pensar. A ciência precisa de tempo para ler, e tempo para fracassar. A ciência nem sempre sabe onde ela se encontra neste exato momento. A ciência se desenvolve de forma instável, através de movimentos bruscos e saltos imprevisíveis à frente [...].”*

Slow Science

## CAPÍTULO I

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS

El reciclado y el recuperado de desechos son métodos que permiten proteger los recursos naturales escasos en el planeta; y aprovechar residuos como materia prima para la fabricación de materiales compuestos. En las últimas décadas, el uso de materiales naturales en matrices poliméricas ha llegado a incrementar la investigación de nuevos materiales compuestos para aplicaciones estructurales, decorativas, o con propiedades funcionales (biomédicos, antimicrobianos, etc.). De esta manera, los materiales compuestos de plástico con refuerzos de partículas de madera pueden ser utilizados como una alternativa al uso de madera pura, con mejores propiedades mecánicas y ciertas ventajas, tales como resistencia a la humedad, resistencia a las termitas y bajo costo.

#### 1.1 Impacto ambiental del reciclaje de residuos sólidos en el Perú

Los residuos sólidos están constituidos por desechos orgánicos e inorgánicos que se generan al final de todo proceso productivo (fabricación, transformación y utilización). Un residuo se convierte en desecho cuando éste no se reutiliza en un proceso posterior (como materia prima o aditivo), o cuando no tiene valor como subproducto de proceso. Por tanto, la disposición final de estos residuos (ahora desechos) es muy importante a fin de evitar focos de contaminación ambiental, que representen riesgos para la salud (Najafi, 2013).

En el Perú, el ministerio del ambiente es el encargado de velar por la calidad del medio ambiente; sin embargo, pocos estudios nacionales se han llevado a cabo. De acuerdo al último informe de “Gestión de Residuos Sólidos Municipales en el Perú: Año 2010-2011” (MINAM, 2012) ha concluido que en total se generan 20.000 toneladas de residuos al día, con una mayor contribución de los habitantes en la costa. Incluso en Lima se generan cerca de 2,2 millones de toneladas anuales de residuos, lo que significaría 0,61kg al día por persona en promedio.

La composición de estos residuos, de acuerdo al informe, se divide en restos orgánicos (cocina y alimentos) en 47%, plásticos en 9,48% y residuos peligrosos en 6,37%. Estos últimos abarcan todos los desechos que causan daños a la salud, como desechos hospitalarios, desechos industriales o relaves mineros. De todos estos residuos, los plásticos (especialmente termoplásticos) podrían ser reciclados, como por ejemplo el polietileno tereftalato (PET), polietileno de alta densidad

(PEAD), polietileno de baja densidad (PEBD) y polipropileno (PP). Con respecto a estos termoplásticos, según Pacheco (2000), el PEAD es utilizado por su facilidad de moldeo y por la aplicación en la fabricación de embalajes; mientras que el PET es empleado en la fabricación de botellas, recipientes o envases que se utilizan en supermercados (Botero, 2015).

Por lo tanto, Harper (1996) justificó que el reciclado apropiado de estos polímeros mantiene su resistencia al impacto y disminuyen la degradación ambiental.

La industria del reciclaje, de acuerdo a Velarde (1998), ha nacido sin un control adecuado ni una orientación clara. Claramente, esto se puede deducir por la ineficiencia de los procesos y limitada capacidad económica y financiera. Cabe resaltar que, en el Perú, durante 1998, existían cerca de 500 empresas, las cuales tenían una producción reducida. Por otro lado, no existe una industria petroquímica que sirva de precursora para el manejo ambiental de residuos de plástico. No obstante, otros estudios (Olakanmi, 2016) ven esto como una oportunidad de incorporar residuos a líneas de proceso, promoviendo el reciclaje y el cuidado del medio ambiente. De acuerdo a Gómez (2014) la gestión de los residuos sólidos está influenciada por la cultura de los ciudadanos y el desenvolvimiento de las autoridades en dicho aspecto. Por tanto, esto englobaría tres ejes de desarrollo de una sociedad, que serían población, estado y empresas (Velarde 1998).

## 1.2 Los materiales compuestos

Los materiales compuestos han encontrado interés científico debido a la diversidad de propiedades que se puede obtener mediante la combinación de dos o más materiales. De acuerdo a Hull (1981) estos materiales son considerados *nuevos materiales*, con propiedades físicamente distintas, y que sus constituyentes puedan ser distinguidos microscópicamente, con una dispersión adecuada que permita el desarrollo de propiedades óptimas. Los materiales compuestos están formados por un constituyente que actúa como refuerzo y otra fase que es un componente aglutinante conocido como matriz. Es decir, un material compuesto es la combinación de dos o más materiales que se diferencian en forma, composición química, función y son insolubles entre sí; formando un material con mejores propiedades a la de los componentes individuales (Ramos, 2010).

Los materiales compuestos pueden ser reforzados por fibras o partículas, los primeros poseen resistencia, rigidez y otras propiedades físicas diferentes a la

orientación del material; en cambio, los materiales reforzados con partículas presentan propiedades más isotrópicas (Dai, 2014).

### 1.3 Materiales compuestos de matriz polimérica y madera

Los compuestos de plástico y madera (CPM), más conocidos como “*Wood Plastic Composites*” son compuestos que han sido estudiados y desarrollados en países como Estados Unidos, países de la Comunidad Europea, e incluso Chile. Han sido ampliamente usados para el diseño de paneles (placas), y de ellos se pueden elaborar otros productos como perfiles, láminas, tableros, marcos, etc. (Wechsler, 2007).

Estos compuestos han llamado poderosamente la atención debido a que se les puede procesar de manera similar que los plásticos puros. Es decir, se pueden aplicar procesos de extrusión (Nuñez, 2003; Soccalingame, 2015 y Friedrich, 2016), compresión (Wechsler, 2007) y rotomoldeo (Greco, 2014), tecnologías atractivas por el bajo costo del proceso. El resultado es un material resistente al deterioro biológico en exteriores (donde productos como la madera pueden fallar), mejor resistencia térmica y mejor resistencia al creep (en comparación con los plásticos puros).

En los CPM, las propiedades más importantes están relacionadas con las materias primas, dimensiones de refuerzo, presencia de aglomeraciones (concentración crítica) y empleo de aditivos como agentes acoplantes, pigmentos, estabilizadores antimicrobianos, etc. (Myers, 1991). En base a la estructura química, existe poca compatibilidad entre la naturaleza hidrofóbica de los termoplásticos no polares (p.e. polipropileno) y la naturaleza hidrofílica de la celulosa (Hristov, 2004). Por ello, tratamientos que se llevan a cabo con aditivos acoplantes como anhídrido maléico, son adecuados para generar una adecuada adhesión interfacial entre madera y plástico (Ichazo, 2001).

### 1.4 El polipropileno (PP)

El polipropileno (PP) es un termoplástico natural producido por polimerización de moléculas de propileno (monómeros) hasta lograr cadenas poliméricas. Existen diversos tipos de enlazar estos monómeros, siendo el proceso catalítico el más importante, pues permite obtener cadenas poliméricas cristalizables. Por esta razón, es que se conoce al PP como un polímero semicristalino con buenas

propiedades físicas, mecánicas y térmicas. Su uso va desde adhesivos y sellantes, hasta masillas (Balow, 2003).

#### 1.4.1 Tipos de polipropileno

De los procesos de síntesis, se pueden obtener dos productos: el polipropileno isotáctico (i-PP, cristizable) y el polipropileno atáctico (a-PP, no cristizable). Por tanto, como ya se mencionó, el polipropileno tiene una naturaleza semicristalina, y las propiedades estarán afectadas por la proporción de las regiones cristalinas y amorfas. Cabe mencionar que las características estereoquímicas y estructurales de las cadenas poliméricas pueden influenciarse debido al proceso (extrusión, moldeo o termoformado) y producto final obtenido (Balow, 2003).

##### a. Homopolímero (HPP)

Un homopolímero es polipropileno que contiene solo monómeros de polipropileno semicristalino. Es la materia prima más empleada para la fabricación de todos los tipos de polipropileno. La fabricación se basa en enlazar monómeros PP mediante reactores catalíticos, obteniendo como resultado cadenas poliméricas cristalizables (Poelt, 2010; Fan, 2011). Esto es muy importante puesto que la fusión o ablandamiento por calor dependen de las variables de proceso de fabricación, y, por tanto, el PP debe contar con propiedades adecuadas (Dasari, 2004). De acuerdo a Balow (2003) la cristalizabilidad de las cadenas es un factor determinante en la formación de cristalitos, y la morfología de estos tiene gran influencia en el calor requerido para la fusión o ablandamiento del plástico. Para verificar esta propiedad, suelen emplearse ensayos de índice de fluidez (IFM) según ASTM o ISO MFR.

##### b. Copolímero estadístico (RCP)

Los copolímeros estadísticos consisten en PP copolimerizados con pequeñas cantidades de etileno (menor a 7%). Esto permite variar las propiedades de las cadenas poliméricas significativamente, dando como resultado un material con mejores propiedades de impacto, mejor claridad, con una menor temperatura de fusión y una mayor flexibilidad. Las cadenas de etileno generan defectos en la periodicidad de la cadena de PP, inhibiendo la capacidad de cristalización de las cadenas (Balow, 2003).

### c. Copolímero de impacto o en bloque (ICP)

Los copolímeros de impacto son una mezcla física de homopolímeros y copolímeros estadísticos de polipropileno, con un pequeño contenido de etileno (6-15% en peso), especialmente para zonas donde se requiere resistencia al impacto a bajas temperaturas (Balow, 2003 y Fernández, 2015). El proceso de fabricación puede realizarse por extrusión o por polimerización y entrecruzamiento en un sistema de reactores (Shi, 2016). Estructuralmente, el copolímero estadístico contiene entre 40 y 65% de etileno, lo que compone una fase elastomérica. Según Dao (1983) las propiedades de impacto suelen variar con el tamaño y distribución de las fases elastoméricas, y estas suelen ser óptimas entre un 5 y 20% de concentración de estas fases.

#### 1.4.2 Propiedades del polipropileno

El polipropileno, como todo polímero, está compuesto por una serie de cadenas PP, las cuales varían en tamaño, por lo que es complicado describir las propiedades de los polímeros solo por el peso molecular promedio de las cadenas. Por tanto, es preferible estudiar, además, la distribución molecular de estas cadenas, a fin de describir sus propiedades. Adicionalmente, existe una gran influencia en el tipo de PP (incluyendo polipropileno reciclado) y de los procesos de termoformado (Carneiro, 2015).

Las propiedades reológicas, tal vez sean las más importantes para el estudio, pues están directamente relacionados a los procesos de formación de fibras y películas por extrusión o inyección. La primera propiedad (la más importante) es la viscosidad, la cual está directamente relacionada al peso molecular promedio ( $M_w$ ). También, esta propiedad depende de la distribución de peso molecular, la cual se puede variar en el proceso de producción con catálisis Ziegler-Natta, por ejemplo (INTRATEC, 2013).

Estudios sobre las propiedades térmicas indican que la calorimetría por barrido diferencial es el método más adecuado para estudiar estructuralmente al polipropileno. La temperatura de fusión es una propiedad fundamental pues engloba la presencia de dominios cristalinos (Jeske, 2012). Ésta suele encontrarse alrededor de 160°C para homopolímeros PP (y copolímeros de impacto), mientras que para copolímeros estadísticos la temperatura de fusión está cercana a 145°C. De la misma manera, el enfriamiento desde la temperatura de fusión brinda

información sobre la temperatura y velocidad de cristalización, especialmente si existe presencia de agentes nucleantes (dan lugar a formación de esferulitas). Otra transición importante es la transición vítrea, donde se demuestra la presencia de zonas amorfas en el polipropileno. En PP isotáctico, la  $T_g$  no suele detectarse fácilmente debido a la pequeña concentración de dominios amorfos, mientras que para PP atáctico, la  $T_g$  está cercana a  $-15^\circ\text{C}$  (Balow, 2013).

Las propiedades mecánicas más importantes para usos de ingeniería son la rigidez, resistencia a la tracción y resistencia al impacto. Por tanto, es importante conocer la estructura y tipo de PP. Estudios realizados por Fernandes (2007) demostraron que el empleo de polipropileno reciclado (PPR) puede ser útil, desde 30 hasta un 50%, de ahí en adelante se pierde resistencia al impacto y se vuelve poco útil. La **Tabla 1.1** resume los resultados de su trabajo.

**Tabla 1.1** Propiedades mecánicas en ensayo de tracción y resistencia al impacto  
(Adaptado de Fernandes, 2007)

Muestra	Resistencia a la tracción (MPa)	Deformación de tracción (%)	Resistencia al Impacto ( $\text{kJ/m}^2$ )
100% PP Virgen	$18,9 \pm 0,1$	$7,1 \pm 1,0$	78,7
Con 30%PPR	$20,5 \pm 0,1$	$7,5 \pm 1,5$	55,1
Con 50%PPR	$21,2 \pm 0,1$	$6,7 \pm 1,0$	42,3
100% PPR	$22,6 \pm 0,1$	$5,1 \pm 1,1$	19,7

En el PP, el módulo de flexión se incrementa con el nivel de cristalinidad, pero también depende de la morfología de la zona cristalina. Estudios realizados por Patti (2015), los valores de módulo elástico y la resistencia en flexión son  $1825 \pm 157$  y  $44,21 \pm 3,24$  respectivamente. Por tanto, en homopolímeros, la rigidez decrece conforme la cristalizabilidad (tacticidad) decrece; y en los copolímeros estadísticos, la rigidez suele aumentar con el contenido de etileno, pues éste disminuye la cristalizabilidad del polipropileno.

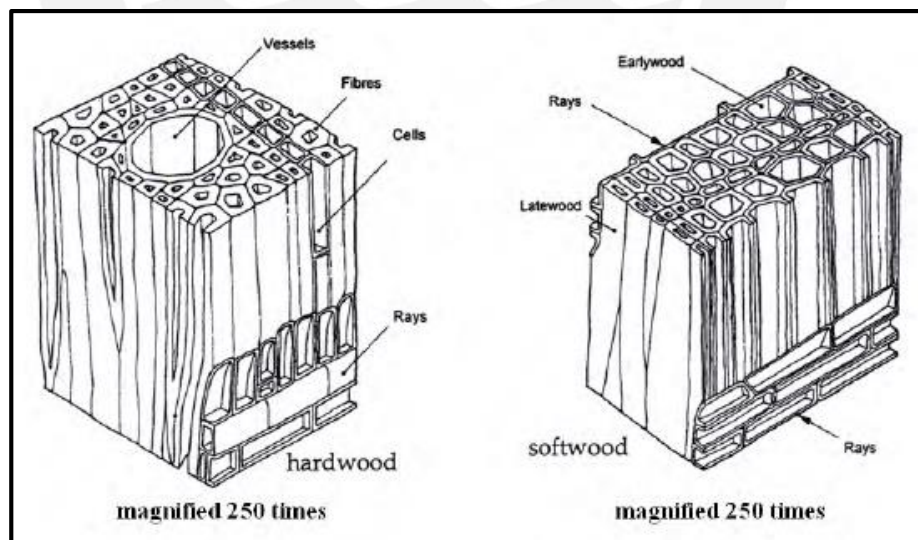
## 1.5 La madera

La madera es una compleja estructura biológica, y en sí es un compuesto biomolecular constituido de varias sustancias químicas y tipos de células que

actúan en conjunto para cumplir con las necesidades de la planta. Dentro de las sustancias que se conocen, se encuentran la celulosa y la lignina; y la interacción entre ambas es útil para comprender propiedades como resistencia mecánica, creep, durabilidad y envejecimiento, pureza de celulosa (pulpa) y digestibilidad con la presencia de nutrientes (Dai, 2014).

La madera natural puede clasificarse como “madera blanda” y “madera dura” (véase **Figura 1.1**); sin embargo, no todas las maderas blandas son blandas, ni las maderas duras son 100% duras (Mathuana, 2015). Botánicamente, las maderas blandas son aquellas que vienen de gimnospermas (coníferas). Estructuralmente, las maderas blandas tienen una estructura más básica que las maderas duras; ya que, presentan dos tipos de células y con variaciones relativamente pequeñas. Las maderas duras vienen de las angiospermas (plantas florales) y presentan una estructura compleja debido al gran número de tipos de células y la amplia variedad del tipo de células (Wiedenhoeft).

En el hemisferio norte, por ejemplo, las maderas blandas son encontradas en árboles como el pino (*Pinus*) y píceas (*Picea*), mientras que las maderas duras son típicas de árboles como maples (Acer), betula (Betula) y roble (Quercus) [Olankanmi, 2016].



**Figura 1.1.** Estructura de la madera dura y blanda (Kuklic, 2008)

### 1.5.1 Estructura biológica de la madera

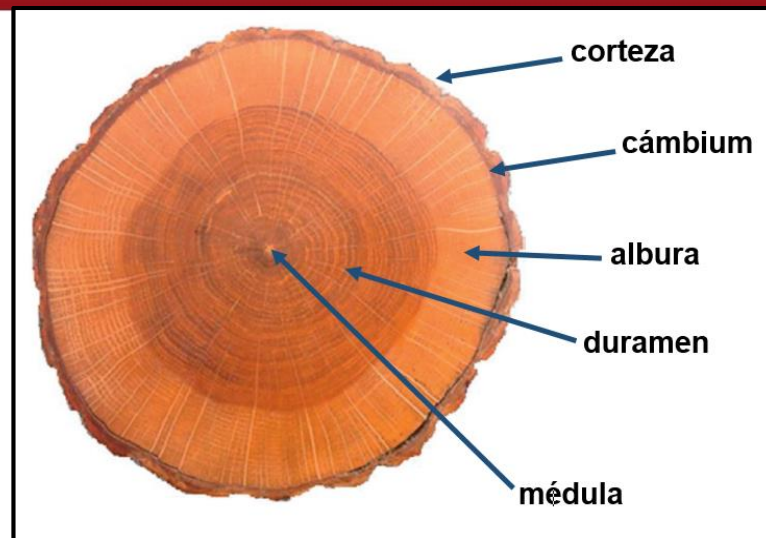
Un árbol tiene dos zonas claramente definidas: la raíz y el tallo (tronco y las hojas). Las raíces son estructuras subterráneas responsables de la absorción de minerales

y agua del suelo, soporte mecánico del tallo y para almacenamiento de bioquímicos. El tallo, por otro lado, está constituido de un tronco y de la copa (hojas, ramas), y son las partes visibles del árbol (Wiedenhoeft).

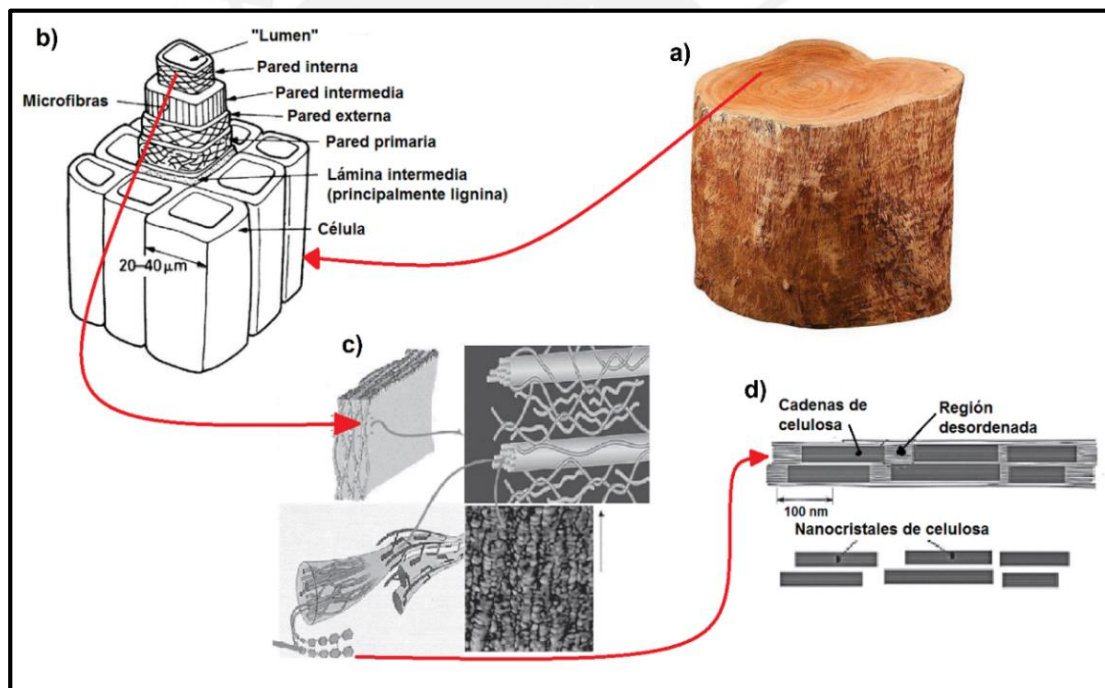
El tronco de un árbol podría asemejarse al esqueleto humano, pues cumple la función de estructura principal. De manera simplificada, existen un número de anillos dentro del tronco que se van agregando por cada año de vida de un árbol, que se conocen como “anillos anuales”. A continuación, se describirá las partes de un tronco (véase **Figura 1.2**) de acuerdo a Spears (2015), Matuana (2009) y Stark (2001).

- **Corteza:** Es la capa exterior del tronco, la cual protege la madera interna. Esta corteza está compuesta de dos partes, la parte más externa que está compuesta de células muertas; y la parte interna (floema) compuesta de células vivas. Esta zona interna tiene la función biológica de llevar la savia de azúcar desde las hojas al resto del árbol.
- **Cámbium:** Es una capa delgada compuesta de células vivas, y se encarga de crear más células, siendo responsables del crecimiento del árbol.
- **Albura:** También llamado “xilema” o “xilema secundaria”, es una red de células vivas la cuales tienen la función de llevar el agua y nutrientes desde la raíz hasta las ramas y hojas. Se considera que es la madera más joven, y con el tiempo las células mueren para pasar a formar parte del duramen.
- **Duramen:** Es la madera más dura del árbol, y proporciona fortaleza y soporte. Se forma a partir de la albura muerta. Esta zona ya no funciona como una zona de transporte de agua, y normalmente es más oscura que la albura.
- **Médula:** Es una zona de células vivas esponjosas que se ubican en el centro del tronco. Cumple la función de transporte de nutrientes esenciales, y se encuentra protegido contra insectos, animales y erosión.

Microscópicamente el tronco se puede distinguir como la **Figura 1.3**.



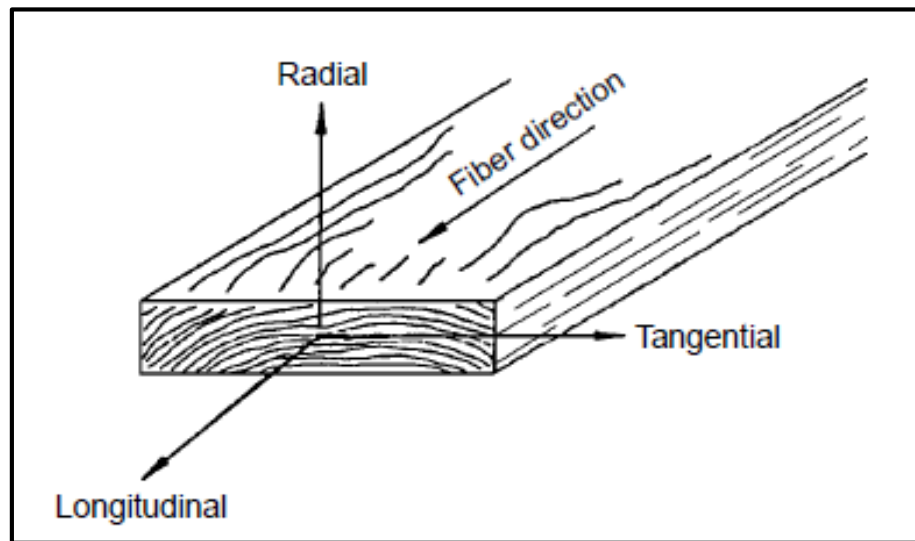
**Figura 1.2.** Estructura macroscópica del tronco



**Figura 1.3.** Estructura microscópica de la madera, a) tronco de madera, b) estructura molecular de la pared celular, c) arreglo a nivel nanométrico. (Adaptado de Dai, 2014; y Olakanmi, 2016)

La madera puede describirse como un material ortotrópico, lo que significa que tiene propiedades únicas e independientes en las direcciones longitudinal, transversal y tangencial (véase **Figura 1.4**). La sección 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 (Green, 1999).



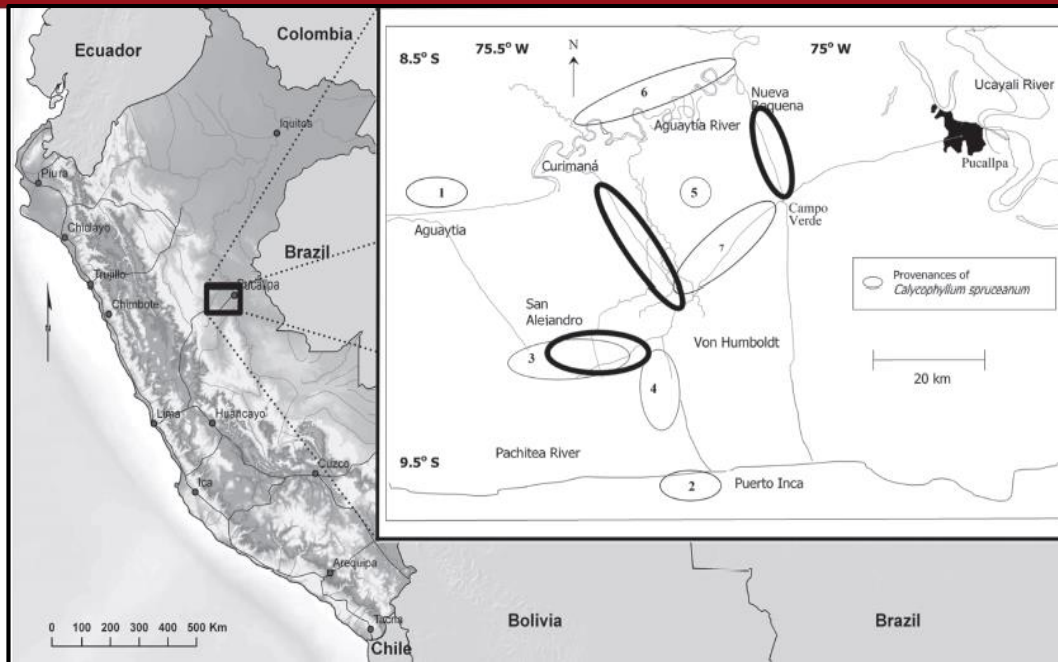
**Figura 1.4.** Tres ejes principales de la madera (Adaptado de Green, 1999).

De acuerdo a esto, es posible mencionar que, para describir las propiedades elásticas se necesitarán 12 constantes: 3 módulos elásticos, 3 módulos de rigidez y 6 coeficientes de Poisson. El módulo de elasticidad implica deformaciones.

### 1.5.2 La madera capirona (MC)

La madera capirona posee el nombre científico de *Calycophyllum spruceanum* (Benth) Hook y pertenece a la familia de los Rubiaceae. Esta especie es conocida en diferentes partes de latinoamerica con diversos nombres. Así, en Colombia se conoce como Alazano, Guayabo, Joveroso, Guayabete; en Bolivia como Guayabochi; en Ecuador como Corusicao; y en Brasil como Pau mulato (LKS, 2006).

La Capirona se encuentra en los bosques del Ecuador, Bolivia, Colombia, hasta la Amazonía del Perú y Brasil (AMAZONÍA VIVA), en zonas de altura y en terrenos inundados o no, comúnmente en los departamentos de Amazonas, Huánuco, San Martín, Madre de Dios, Loreto y Ucayali (véase **Figura 1.5**). El volumen bruto estimado de la especie en la Amazonía peruana asciende a 4,5 m<sup>3</sup>/ha (LKS, 2006).



**Figura 1.5.** Locación geográfica de 7 proveniencias de *Calycophyllum spruceanum* en la zona de Aguaytía, Amazonía de Perú (Adaptado de Montes 2008)

#### a. Características de la capirona

Esta madera posee características principales como un color de albura blanco, un color de duramen marrón (amarillento pálido) y olor a vainilla (FAO-PAFBOL). La altura del árbol llega entre 20 y 35 m, un diámetro de 0,7 – 1,8 m, y el tronco es cónico, uniforme y liso (AMAZONÍA VIVA). Por otra parte, los árboles florecen en los meses de abril y junio y dan frutos en agosto y septiembre (Rede de Sementes da Amazônia).

Además de ello, un estudio realizado por Couturier (1995) indica que la capirona es una especie que no es muy atacada por insectos, aunque se han encontrado en esta especie de insectos fitófagos, solo una daña a la madera y puede ser controlada durante los primeros meses de cultivo.

#### b. Propiedades mecánicas y físicas de la capirona

Las Tablas 1.2y 1.3 reúnen algunas propiedades mecánicas y físicas de la madera capirona encontradas en investigaciones anteriores.

**Tabla 1.2** Propiedades mecánicas de la MC (Adaptado de Escobar, 1993)

Condición CH%	Flexión estática (kg/cm <sup>2</sup> )			Tenacidad (kg-m)	
	ELP	MOR	MOEx10 <sup>-3</sup>	Rad	Tang.
<b>Verde +30%</b>	683	1028	108	5,66	6,00
<b>Seco al aire 12%</b>	813	1312	162	4,17	4,68

donde,

ELP: Esfuerzo en el límite proporcional

MOR: Módulo de ruptura

MOE: Módulo de elasticidad

**Tabla 1.3** Propiedades físicas de la MC (Adaptado de Escobar, 1993)

Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Verde	Seca al aire	Anhida	Básica
	1,07	0,90	0,86	0,74
Contracción Normal (%)	Tangencial	Radial	Volumétrica	T/R
	4,5	2,4	6,9	1,87
Contracción Total (%)	9,2	5,0	14,2	1,84

Como se puede observar, las propiedades son altas lo cual guarda relación con su densidad.

### c. Aplicaciones de la capirona

La capirona es moderadamente pesada, dura, resistente al deterioro y fácil de trabajar (Rede de Sementes da Amazônia). Por lo que, actualmente, sus aplicaciones son en pisos, escaleras, muebles y carpintería en general. No obstante, de acuerdo a sus propiedades y características poseen un uso potencial en estructuras pesadas, armazón de barcos, ebanistería, mangos para herramientas, artículos deportivos, etc (AMAZONÍA VIVA).

Por otro lado, permite el uso tópico para tratar cortes, heridas y quemaduras. A su vez, la savia es considerada antibacteriana y antioxidante; por tanto, suele ser empleada en cosméticos para disminuir las manchas y cicatrices (Rede de Sementes da Amazônia). También, la corteza y sabia de la capirona tiene un uso medicinal en la bronquitis (Gupta, 2006).

## **1.6 Procesos de manufactura de los CPM**

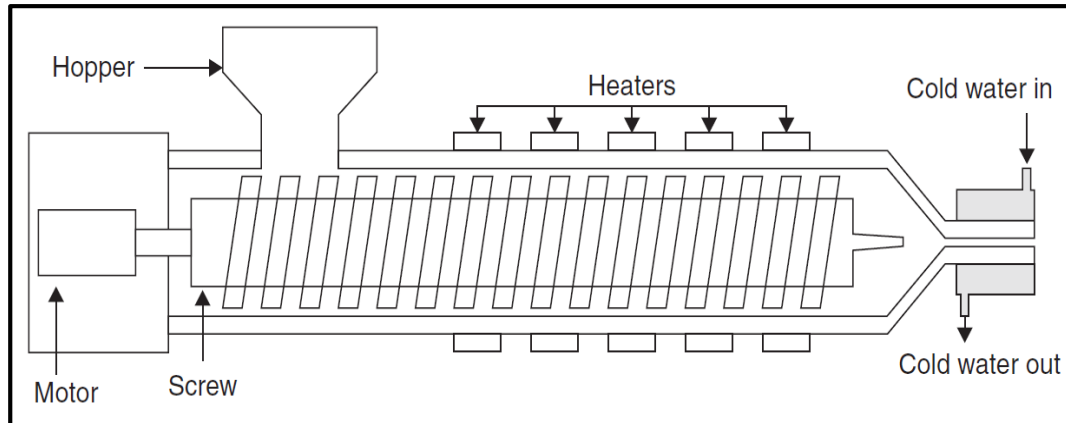
Los materiales compuestos son obtenidos de acuerdo a varios procesos, tales como el de compresión, inyección, moldeo rotacional, extrusión, entre otros. El primero utiliza una cantidad de material determinada, la cual es colocada en un molde donde se aplica calor y posteriormente presión hasta que el material tome la forma requerida, luego es retirado del molde (Madsen, 2011). Actualmente se ha desarrollado equipos que permiten el procesamiento de CPM; sin embargo, existe una discrepancia entre fabricantes sobre la mejor configuración de éstas máquinas, debido a que algunas requieren previamente que la madera sea secada y otras utilizan la madera húmeda; además, algunas permiten el ingreso de la mezcla homogeneizada y otras la madera y el polímero por separado. A su vez, existen extrusoras que permiten el secado de la madera; sin embargo, pueden generar problemas en la consistencia de la masa fundida debido a las alteraciones de la humedad y el aumento en los costos de los equipos (Machado, 2000 y Markovich, 2002).

De esta manera, cada proceso considera diversos parámetros de fabricación, tales como el proceso de manufactura, la elección de materiales, tamaño de partículas, etc. con lo cual se busca obtener un material homogéneo y una adecuada adhesión entre las partículas de la matriz con el refuerzo para obtener mejores características térmicas y propiedades mecánicas. A continuación, se describen algunos de los procesos más empleados en la fabricación de CPM.

### **1.6.1 Extrusión**

La extrusión puede considerarse el proceso más importante para la manufactura de CPM. Este proceso es ampliamente usado en otros materiales como cemento, PLA y almidón. Por otro lado, el empleo de madera introduce nuevos retos al proceso, principalmente por el contenido de humedad y la gran sensibilidad de la madera a retener agua en su estructura. No obstante, ello ha sido mejorado con procesos

previos de secado en hornos (cerca de 90°C por 24 h) [Dai, 2014]. En la **Figura 1.6** se puede observar un esquema del moldeo por extrusión.

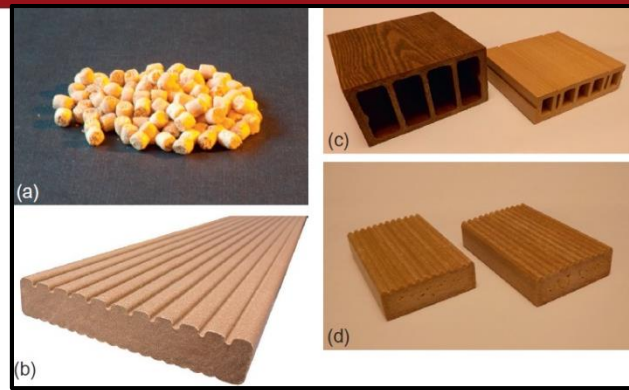


**Figura 1.6.** Esquema del moldeo por extrusión (Dai 2014)

De acuerdo a Matuana (2015), cerca del 80% de los CPM son producidos por este método, y se emplea polvo de madera con un tamaño de partícula equivalente a la malla #140 o mayor. También se menciona que las matrices poliméricas termoplásticas más empleadas son el polietileno, polipropileno, poliestireno, policloruro de vinil, principalmente porque no se decoloran por altas temperaturas. Las variables de proceso suelen estar relacionadas con el diseño del equipo (velocidad y diseño del tornillo), velocidad de alimentación. Según Matuana (2009), la alimentación con pellets de CPM son muy útiles para el control de humedad (**Figura 1.7a**). Por otro lado, el gradiente de degradación debe ser cuidadosamente manejado para evitar la degradación de la madera.

Como se observa en la **Figura 1.7**, es posible fabricar estructuras de CPM, principalmente perfiles, cuyas propiedades son adecuadas para muebles, marcos y revestimientos. También se han fabricado espumas para incrementar la resistencia al impacto de los materiales CPM.

Como resultado, se obtienen piezas con mejor resistencia a la tracción, rigidez, tenacidad, buena distribución de fibras y adecuada orientación; no obstante, puede detectarse la presencia de vacíos en la interfase plástico - madera por la presencia de humedad o volatilización de compuestos orgánicos (Spears, 2015).



**Figura 1.7.** a) Pellets de polipropileno con un 80% de polvo de madera, b) perfiles macizos, c) dos perfiles con diferente textura de madera, d) núcleo de espuma de baja densidad (espuma) para perfiles (Adaptado de Spears, 2015)

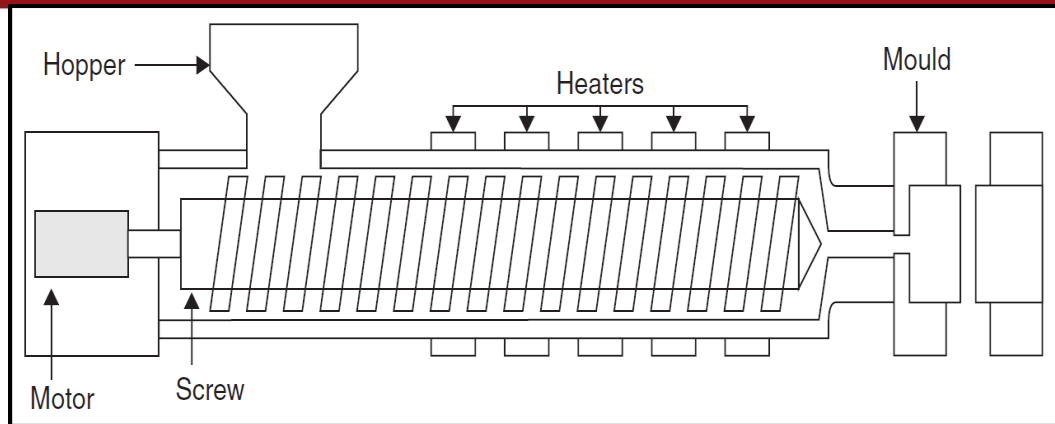
### 1.6.2 Inyección

Este proceso es usado en cerca de un tercio de los productos poliméricos, especialmente para elementos con geometría complicada y de alta producción; con buenas tolerancias, tiempos de ciclos pequeños, y pocos trabajos posteriores (véase **Figura 1.8**)

En este proceso, se han utilizado pellets preparados por extrusión. Las matrices poliméricas deben presentar bajo peso molecular para lograr una adecuada viscosidad. También depende de la temperatura de proceso y configuración del refuerzo (fibras, partículas) [Stark, 1997]. En la **Figura 1.9**, se presenta un esquema del proceso mencionado.



**Figura 1.8.** Masetas diseñadas por inyección (Adaptado de Spears, 2015)



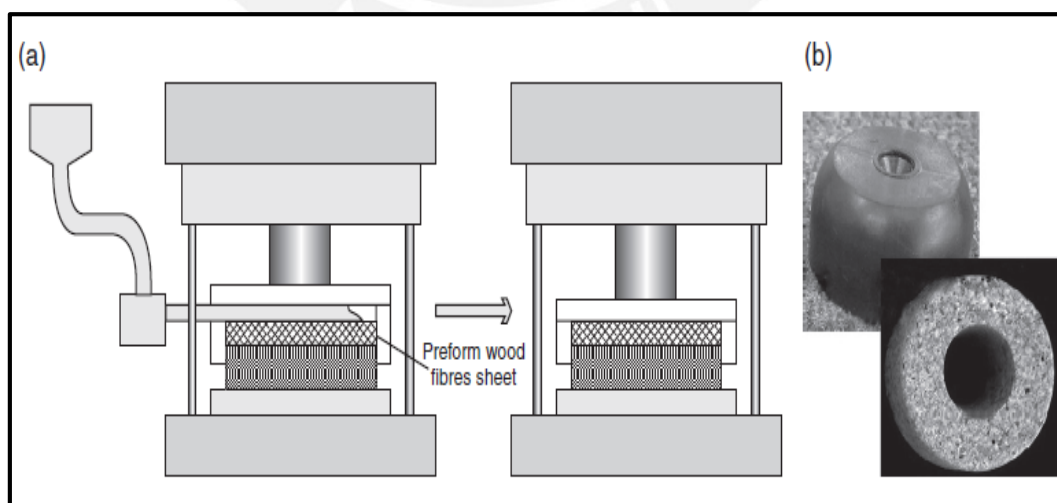
**Figura 1.9.** Esquema del proceso de inyección (Dai, 2014)

### 1.6.3 Moldeo por compresión

Es un procedimiento muy utilizado para la manufactura de CPM. La compresión es un método de moldeo en el cual el material es colocado en un molde (cavidad) y precalentado (véase **Figura 1.10**).

Esta forma de moldeo ha probado ser muy útil para la producción de perfiles de CPM con matrices termoplásticas y termoestables (Spears, 2015).

Las propiedades mecánicas y estabilidad dimensional están influenciadas por el diseño de la cavidad del molde, ubicación de la carga y parámetros de procesos, tales como la temperatura de componentes, velocidades de calentamiento y enfriamiento, y velocidades de carga y descarga (Sobczak, 2012).



**Figura 1.10.** a) Esquema de moldeo por compresión, b) productos. (Dai, 2014)

#### 1.6.4 Parámetros que influyen en la fabricación de los CPM

Existen diferentes parámetros que deben ser observados en el proceso de fabricación de los CPM.

##### a. Estructura y composición química de la madera

Las paredes celulares de las fibras de madera están constituidas por celulosa, hemicelulosa, lignina y con pocas cantidades de extractivos (5%). La composición de las microfibrillas aproximadamente está dada por 45% de celulosa, 20% de hemicelulosa y 20% de lignina (Ashby, 2013).

Estos componentes varían entre las diversas especies de madera; así, las composiciones químicas de la madera tienden a influenciar las propiedades de los compuestos (Li, 2011). Por tanto, en el caso de la capirona, al ser una madera dura posee mayor estabilidad térmica que las maderas blandas como resultado de a variación de sus componentes (citado en Olakanmi, 2016).

##### b. Temperatura de trabajo

Un factor a considerar en la fabricación de estos CPM es su temperatura de trabajo; puesto que, de acuerdo a Youngquist (1996), ésta debe permanecer debajo de la temperatura de degradación de la madera, aproximadamente entre 200-220 °C por su baja resistencia al calor. La exposición de la madera encima de este rango de temperaturas provoca descoloración, liberación de volátiles, apareamiento de olor y fragilidad del compuesto (Frollini, 2000).

##### c. Características de la madera

Las propiedades de la madera dependen de la especie, cantidad, defectos y propiedades físicas y mecánicas; así como la interacción entre la madera y plástico en los CPM (Wolcott 1999).

Un factor a considerar es la humedad y la granulometría, porque esta produce discontinuidades en el proceso de fabricación de piezas con características inaceptables debido a la presencia de manchas o defectos superficiales causadas por procesos termo oxidantes (Stark, 1997), entonces la madera debe ser pre secada. Así, en un trabajo realizado por Stark (2001) estudia la influencia de la absorción de la humedad en las propiedades mecánicas de los compuestos de madera de polvo de PP, dónde a mayor cantidad de madera en peso absorben más

humedad en todas las exposiciones ambientales sin degradar significativamente las propiedades del CPM. Por otro lado, el tamaño de la partícula de madera es importante; ya que, las propiedades de los CPM pueden variar de acuerdo a su tamaño y geometría; de esta manera, diversos estudios han utilizado fibras, partículas o polvo de madera. Estas últimas poseen alguna forma y dimensiones aproximadamente iguales en todas las direcciones; en cambio, las fibras tienen una relación de aspecto ( $l/d$ ) alta (Shirp, 2014); por tanto, dicha característica influye en la interacción entre la matriz-refuerzo.

### 1.7 Tratamientos químicos utilizados en la elaboración de CPM

La función de la madera como uno de los componentes del material compuesto es actuar como refuerzo o relleno, esto depende de diversos factores como el tratamiento de la madera, si existe un agente acoplante que mejore la adherencia entre las partículas de plástico - madera y el tamaño de las mismas.

Raj (1990) estudió un material compuesto moldeado por compresión a partir de polvo de madera de la especie de álamo temblón y polietileno de alta densidad (PEAD), variando el peso en fracciones del polvo de madera. Con la finalidad de mejorar la adhesión superficial entre las partículas del material compuesto recubrió el polvo de madera o la mezcla con diversos agentes de acoplamiento como alcoxy-silano (A-172 y A-174) y polimetileno polifenil-isocianato, de esta manera con el segundo obtuvo valores de resistencia a la tracción y módulo más altos que con el primero; no obstante, la resistencia al impacto disminuyó a causa de la aplicación de los agentes de acoplamiento. La influencia del uso de agentes de acoplamiento aplicados en las partículas de madera y HDPE también ha sido investigado por Carrasco (1993), así utilizó epolene C-18 y silano 174 y encontró que el uso de acoplamiento de silano en el material compuesto tiene mejores propiedades que el uso de epolene.

Un estudio realizado por Zhang (2009) encontró que el tratamiento en las partículas de madera de pino del sur con octanoílo cloruro (OC) ya sea en cloroformo o dimetilformamida mejora la reactividad con la matriz, en este caso polipropileno (PP). A su vez, también analizó el caso de añadir un agente de acoplamiento de polipropileno maleado (MAPP) al PP para generar la formación de éster y mejorar la unión con la madera. Con los resultados de esta investigación se concluyó que ambos tratamientos reducen el porcentaje de absorción de humedad del material compuesto con respecto al compuesto sin modificar; sin embargo, el tratamiento

con OC reduce la resistencia a la flexión y módulo de elasticidad y con MAPP se produce un aumento en las propiedades mecánicas. Además, al incrementar la cantidad el polvo de madera el módulo de flexión aumenta; por lo tanto, la madera actúa como un refuerzo. De manera similar, se ha estudiado un material compuesto por fibras de madera de eucalipto, polipropileno y la adición del agente de acoplamiento polipropileno maleado (MAPP), obteniéndose un material con propiedades mejoradas; no obstante, las propiedades de tracción, flexión e impacto disminuyen al incrementar la cantidad de madera (Miravete, 2003).

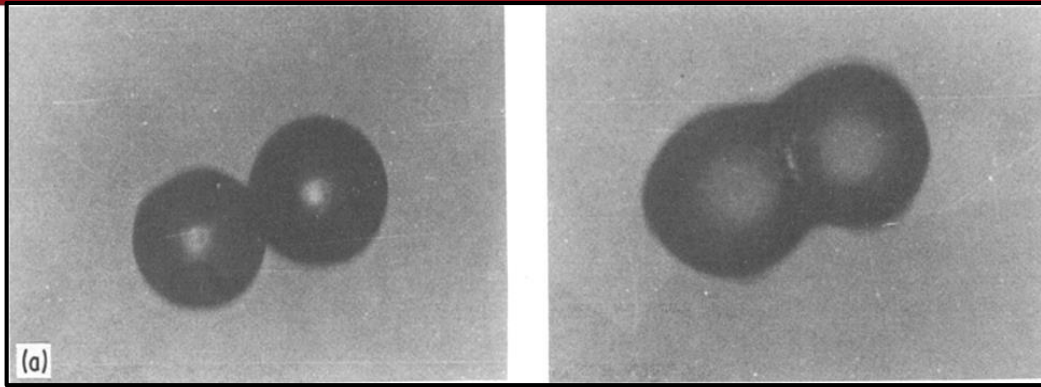
Otra investigación por Joseph (1996) determinó que los diferentes tratamientos químicos con hidróxido sódico, isocianato, y peróxido influyen positivamente en la unión entre los constituyentes y en las propiedades de los materiales compuestos de sisal y PE.

### 1.8 Sinterizado de los polímeros

El sinterizado de un polímero está definido como la formación de una masa homogénea (fundida) a partir de la coalescencia de partículas, y en general, se consideran dos etapas principales en el proceso, que comprende la coalescencia de partículas y la remoción de vacíos (Greco 2003). El proceso de fusión de un polímero semicristalino se da en un rango de temperaturas, y está determinado por el espesor de una pieza (Hellmuth, 1965).

La coalescencia de polímeros a altas temperaturas es un fenómeno importante para el procesamiento de polímeros (amorfos y semicristalinos). Es por ello que la coalescencia libre entre partículas es de especial interés en el proceso de sinterizado de polvos. Los procesos de coalescencia-sinterizado están dominados principalmente por la energía libre superficial (tensión superficial), la cual tiende a reducir el área total de las partículas (Rosenzweig 1981).

Cabe mencionar que el sinterizado en estado sólido no es posible para el procesamiento de los polímeros. En su lugar, la coalescencia de las partículas empieza cuando se dan ciertas condiciones de movilidad que sólo se alcanzan en el estado fundido (Greco 2003), este proceso se puede observar en la **Figura 1.11**.



**Figura 1.11.** Micrografía óptica de partículas poliméricas de poliestireno antes y a 200°C (Adaptado de Siegmann 1986)

### 1.8.1 Etapas del sinterizado

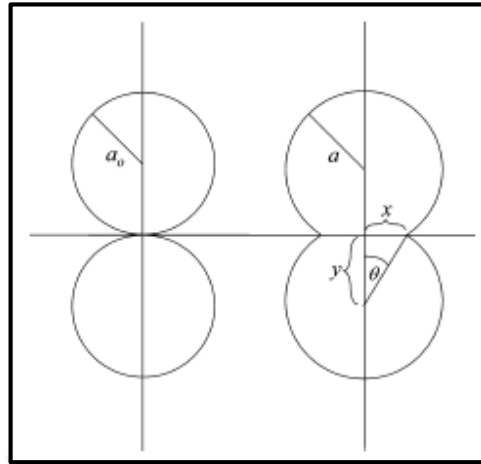
El sinterizado puede ser descrito por 3 etapas, donde el polímero se aglomera hasta conseguir un material denso. De acuerdo a Thümmler (1967), estas etapas son consecutivas, no son fácilmente distinguibles entre ellas.

#### a. Etapa de crecimiento de cuellos

Bajo la influencia de los esfuerzos y el exceso de vacancias, el crecimiento de cuellos procede de manera exponencial en el tiempo. En esta etapa el polímero (partículas) se mantienen invariantes sin que se dé el crecimiento de grano. Los esfuerzos de tracción resultantes de la tensión superficial mantienen los límites de grano entre partículas adyacentes; sin embargo, es posible tener una formación ocasional de nuevos granos. Los puntos de contacto de las partículas se aproximan lentamente (correspondiente a pequeñas contracciones), y se lleva a cabo una disminución en la actividad superficial de las partículas (Rosenzweig 1997).

Frenkel (1945) fue el primero en proponer una expresión que describa la coalescencia viscosa, que fue posteriormente corregida por Echelby (1949). En ella se menciona que dos partículas pueden ser representadas como gotas individuales (véase **Figura 1.12**), donde " $a_0$ " el radio inicial, " $x$ " es el radio del cuello, " $y$ " es la distancia del cuello al centro de la partícula, y  $\theta$  es el ángulo de coalescencia. El trabajo de ambos investigadores, junto con los desarrollados por Scribber (2006), demuestran que este modelo es un resultado de un balance de energía entre la tensión superficial y el trabajo realizado por el estrés reológico. Frenkel además añadió el concepto de que existe una relación entre las propiedades del material,

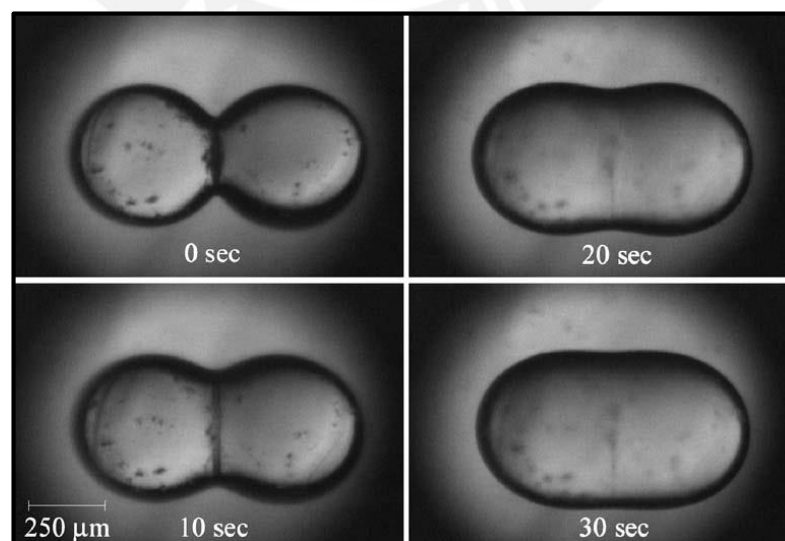
tamaño de partícula y crecimiento viscoso del cuello. Bajo esto, se obtuvo que la relación  $(x/a)$  es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo.



**Figura 1.12.** Evolución de la forma durante la coalescencia de dos partículas esféricas (Adaptado de Scribber 2006)

#### b. Etapa de densificación y crecimiento de grano

Cuando la relación  $x/a$  excede cierto valor después del crecimiento de cuellos, las partículas por separado empiezan a perder su identidad. La mayoría de las contracciones tienen lugar en esta etapa, donde una red coherente de poros se forma y el crecimiento de grano continúa. Los límites de grano generalmente se desplazan a partir de los poros. Cuando cerca del 90% de la densidad teórica se supera, la proporción relativa de los espacios de poros cerrados aumenta rápidamente, lo que lleva a la etapa final de sinterización (véase **Figura 1.13**) [Scribber, 2006].



**Figura 1.13.** Micrografía óptica de coalescencia de gotas de PP (Scribber, 2006)

### c. Etapa final con cierre de porosidades

En la etapa final, los poros y vacíos son cerrados, y la red de poros antes formada va desapareciendo, dando lugar a poros aislados con una forma más esférica. En este punto, la densificación es más lenta, dando como resultado poros residuales, producidos principalmente por gases que no pudieron difundir y se atraparon en estos poros (Beltran, 2012).

#### 1.8.2 Estudio de sinterizado en la elaboración de CPM

Mediante el estudio de varias etapas en el ciclo de moldeo, se pueden distinguir ciertas etapas como se observa en la **Figura 1.14**. La curva H, la cual representa el ambiente que rodea al molde, la curva X e Y a su vez representan la temperatura del molde y el interior del mismo.

Según Beltrán (2012) se pueden distinguir 6 etapas en la curva Y:

1° Inducción de los componentes.

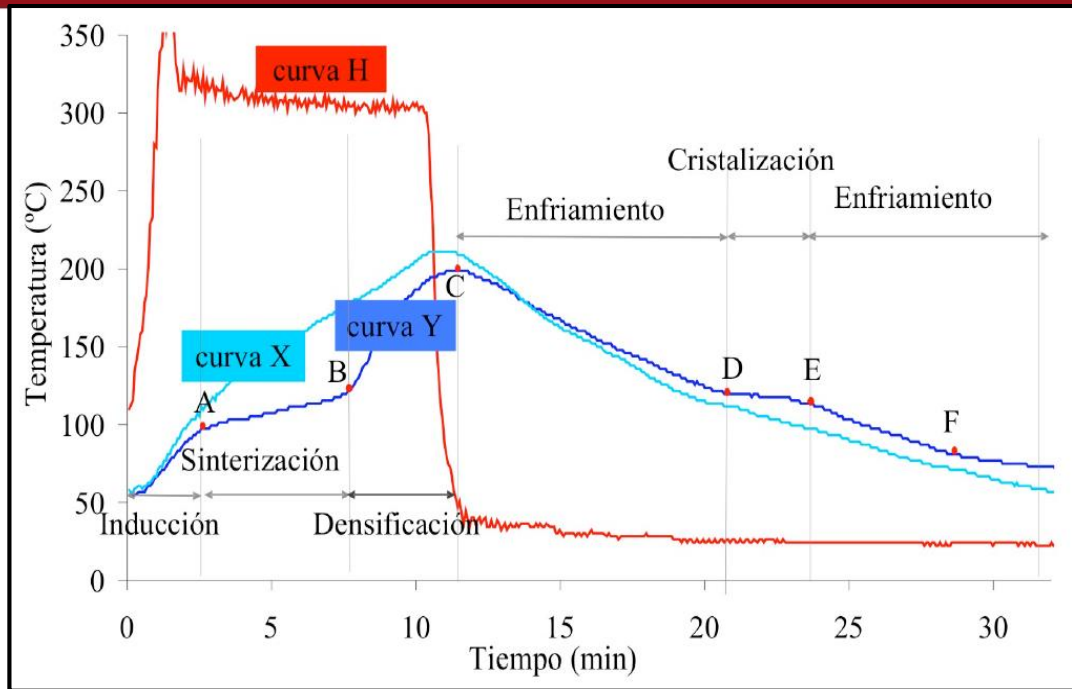
2° Sinterización: Calentamiento de A hasta B, donde el polímero comienza a adherirse a la superficie interior del molde por fusión del mismo. Diferentes capas de polímero quedan adheridas y van absorbiendo calor para fundir lentamente. Esto supone que la temperatura del material se incrementa lentamente.

3° Densificación: En la etapa de B a C, la temperatura aumenta a una mayor velocidad, y durante este periodo, se consolida el fundido.

4° Enfriamiento inicial: Se inicia el enfriamiento y depende del sistema equipo. La temperatura en el molde sigue aumentando debido al calor residual.

5° Cristalización: En polímeros semicristalinos, la temperatura en esta etapa se mantiene constante; sin embargo, el cambio de estado de polímero cristalino a polímero amorfo implica una variación en el volumen específico de un polímero. En esta etapa, al existir una disminución del volumen, existe un aumento en la densidad.

6° Enfriamiento final



**Figura 1.14.** Evolución de la temperatura del aire que rodea al molde (curva H), del molde (curva X) y del interior del molde (curva Y) durante el proceso de moldeo y las etapas durante el ciclo (Adaptado de Beltran, 2012)

### 1.8.3 Métodos de análisis del sinterizado

Diversas investigaciones han utilizado la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) para examinar la morfología de superficie, el sinterizado de las muestras y las superficies de fractura causada por los ensayos mecánicos realizados (Hietala, 2011 y Zhang, 2009). Por el contrario, de acuerdo al estudio experimental desarrollado por Almgre (2007) se analizó que la adhesión interfacial afecta a la resistencia, rigidez y higróexpansión en este tipo de materiales compuestos; de esta manera recomienda también una técnica macroscópica alternativa para cuantificar la capacidad de transferencia de tensión interfacial utilizando espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). En este rubro, Sanadi (1993) desarrolló una prueba de extracción macroscópica para medir las propiedades de corte en la región de la interfase entre la madera y polímero, y analizar los efectos del uso de agentes de acoplamiento en la fabricación del material compuesto y la influencia de la humedad en las propiedades de corte; asimismo, esta propiedad se evaluó por Kazayawoko (1999).

Por otro lado, Hietala (2011) realizó una investigación que consistía en analizar el efecto del proceso de extrusión utilizando como materia prima la madera y, posteriormente, mezclándolo con polipropileno como matriz polimérica. Así, el tamaño de las partículas y fibras de madera separada han sido medidas utilizando métodos de análisis de fibra óptica.

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

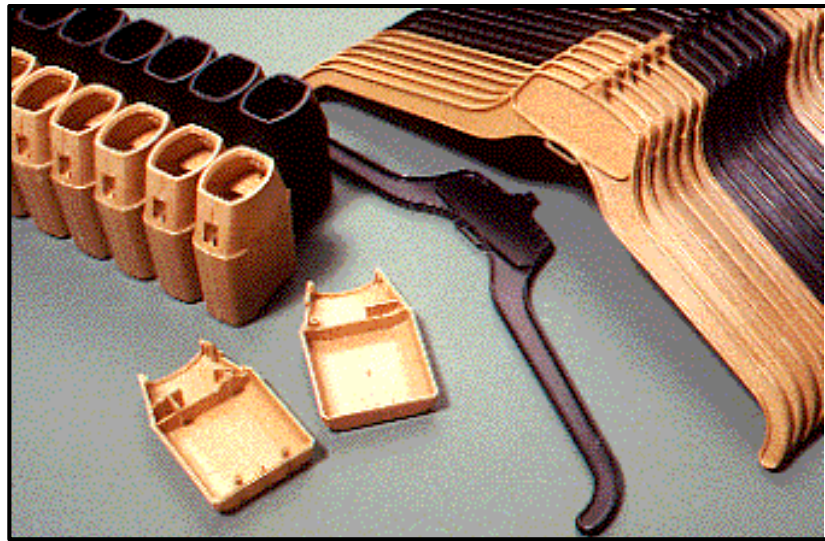
De acuerdo a Eder (2013), a nivel mundial, en el año 2010, se han producido 1,5 millones de toneladas de piezas de CPM por extrusión, que en promedio contienen un 50% de madera. Actualmente, en China se observa el mayor crecimiento y producción de los compuestos CPM producidos por extrusión (aproximadamente 25%), siendo la segunda más grande, solo superada por Estados Unidos. Después de ellos, los mercados emergentes para los CPM son el sudeste de Asia, Rusia, Sudamérica e India.

En las últimas décadas, los materiales CPM han sido ampliamente empleados en la industria de la construcción, automotriz, mobiliario y otras aplicaciones para los consumidores. En Norteamérica, los compuestos CPM se han empleado en la construcción, mientras que en Europa se ha enfocado en la industria automotriz (paneles decorativos en interiores), y en Asia se ha destacado del empleo de CPM en mobiliario para construcciones en interiores y decoraciones (Teuber, 2016).

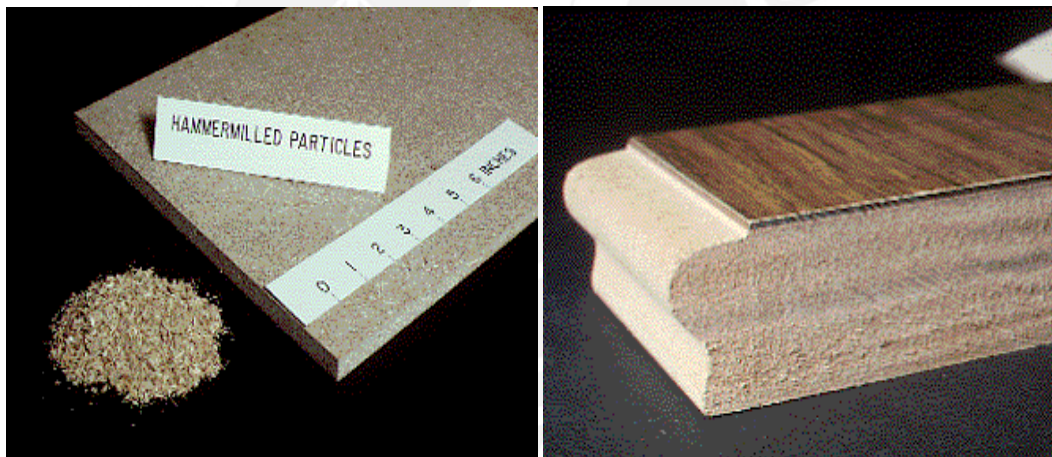
En general, los compuestos CPM han llamado la atención (véase **Figura 1.15**), especialmente aquellos reforzados con fibras de madera debido a:

- Las mejoras en las propiedades específicas como la rigidez, y la mejora en el comportamiento térmico.
- El precio reducido del material.
- La mejora en las propiedades contra la biodegradación.
- Son más reciclables en comparación a los compuestos reforzados con fibra de vidrio.

Los CPM son preferidos debido a que se parecen a la madera pura (véase **Figura 1.16**). Por lo general son más livianos y ofrecen una resistencia y soporte estructural similar a la madera pura. El desarrollo de los compuestos CPM está en auge desde los años 80's y se encuentra en gran crecimiento para distintas aplicaciones (Youngquist, 1999).



**Figura 1.15.** Colgadores de ropa elaborados por compresión (Youngquist 1999)



**Figura 1.16.** CPM con a) partículas, y b) fibras (Youngquist 1999)

Los compuestos que emplean fibra de madera como refuerzo son los compuestos más populares y se han empleado como elementos en diversas industrias. Por ejemplo, en la década de 1940, la compañía Ford desarrolló un prototipo con fibras de cáñamo; y en la década de 1950 se emplearon fibras naturales para el modelo de carro East German Trabant. En la década de 1970 recién se emplean polímeros derivados de petróleo para la fabricación de CPM. En los años 80's se aprovechó esta tecnología para la elaboración de paneles; y durante el 2000 se han empleado piezas de CPM para motivos decorativos (Teuber 2016, Spears 2015). En la **Tabla**

1.4 se reúne algunas aplicaciones de los CPM, así como en las Figuras 1.17 y 1.18 se presentan la utilidad de estos.

**Tabla 1.4** Resumen de aplicaciones de CPM (Adaptado de Eder, 2013 y Youngquist, 1999)

En exteriores	En interiores	Bienes y otros productos
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aplicaciones estructurales dentro del sector construcción, en especial cubiertas, revestimientos, barandas, carpintería de ventanas.</li> <li>- Carpintería de jardín: mueblería, vallas y otras aplicaciones.</li> <li>- Barreras anti-sonido o paneles para jardinería.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- En ingeniería automovilística, para partes expuestas a temperaturas menores a 110°C.</li> <li>- Plataformas de carga para camiones y contenedores.</li> <li>- Puertas (marcos y perfiles), partes de mueblería, sillas, umbrales.</li> <li>- Paneles (especialmente CMP con partículas) para áreas de alta humedad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Instrumentos musicales (guitarras, clarinetes, flautas).</li> <li>- Pequeñas piezas de juguetes, empaques, envases.</li> <li>- Revestimientos para paquetes.</li> <li>- Colgadores de ropa.</li> <li>Partes de electrodomésticos (planchas, aspiradoras).</li> <li>- Marcos.</li> </ul>



**Figura 1.17.** Aplicación en el exterior del CPM (Clemons 2007)



**Figura 1.1.** Algunas piezas elaboradas con CPM (Eder 2013).

Finalmente, existen recientes avances en el empleo de bioplásticos, como por ejemplo PLA como matriz para compuestos reforzados con fibras de madera, los cuales fueron elaborados por la compañía Tecnar (Alemania). También se encuentran compuestos con matriz biopolimérica como el almidón elaborados por extrusión, para elaborar piezas para el mobiliario y puertas, elaboradas por la compañía Fasalex (Austria). Actualmente, el avance más reciente muestra que materiales CPM son elaborados con biopolímeros y madera por inyección por la compañía alemana Ravensburguer (Eder, 2013).

## CAPÍTULO II

### METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El presente capítulo tiene el objetivo de describir el diseño experimental, el cual consiste en determinar los parámetros involucrados en el proceso de sinterizado para la fabricación del material compuesto a partir de plástico reciclado y madera recuperada. Para ello, en primer lugar, se caracterizará la madera y plástico según normas ASTM; posteriormente, se realizarán las pruebas de moldeo por compresión de muestras planas rectangulares para encontrar la temperatura y tiempo de sinterizado, manteniendo constante el tamaño y la cantidad de partícula de madera. Con los parámetros de temperatura y tiempo, se procederá a fabricar las muestras del material compuesto, variando principalmente el contenido y tamaño de partícula de madera. Finalmente, se presentará el proceso de la fabricación de las probetas y los respectivos ensayos de flexión, tracción, impacto, densidad, absorción de agua y ensayos de propiedades térmicas de acuerdo a las normas ASTM.

#### 2.1 Materiales

##### 2.1.1 Partículas de madera capirona

Para esta investigación se ha seleccionado partículas de madera de la especie capirona (véase **Figura 2.1**), las cuales se recuperaron de una fábrica de muebles del distrito de Villa El Salvador (Lima) y se clasificaron según su tamaño mediante diversos tamices designados de acuerdo a la norma ASTM E11-15.



**Figura 2.1.** Madera capirona: a) residuos recuperados, b) partículas clasificadas con la malla MR2

Cabe resaltar que las partículas de madera no han recibido ningún tratamiento y los resultados de su caracterización se presentan en la **Tabla 2.1**.

**Tabla 2.1** Características de la capirona (Smith 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
Módulo elástico en flexión (fibra longitudinal)	13 526

### 2.1.2 Partículas de plástico

Para la etapa de investigación, se han utilizado partículas de polipropileno reciclado (PPR) obtenidas a partir del picado de tapas roscas plásticas, las cuales fueron adquiridas de la empresa CLOSURE SYSTEMS INTERNATIONAL ALUSUD PERÚ S.A (véase **Figura 2.2**). El tipo de tapa de PP empleado es el P28AQL360, cuyo color es blanco y no poseen “liners” (discos de sellado interno). En la **Tabla 2.2**, se presenta las propiedades del homopolímero PROPILCO GRADO 02H84N.



**Figura 2.2.** Polipropileno reciclado: a) tapa roscas, b) partículas

**Tabla 2.2** Principales propiedades del polipropileno PROPILCO 02H84ND (datos proporcionados por ALUSUD PERÚ S.A.)

Propiedades Físicas	Método	Valor	Unidades
Índice de Fluidez (230 °C - 2,16 kg)	ASTM D 1238	2,1	g/10 min
Densidad	ASTM D 1505	0,91	g/cm <sup>3</sup>
Propiedades Mecánicas	Método	Valor	Unidades
Resistencia máxima a la tracción (50 mm/min)	ASTM D 638	37,23	MPa
Elongación al punto de cedencia (50 mm/min)	ASTM D 638	7,0	%
Módulo de flexión 1% secante (1,3 mm/min)	ASTM D 790A	1723,7	MPa
Impacto Izod con ranura (23 °C)	ASTM D 256	37,37	J/m
Propiedades Térmicas	Método	Valor	Unidades
Punto de fusión	ASTM D 3418	130 - 170	°C

## 2.2 Caracterización de la madera capirona

### 2.2.1 Equipos e instrumentos empleados

#### a. Tamices:

El sistema de clasificación de tamaños de partículas de la madera capirona consiste en 5 tamices formados por mallas de acero inoxidable normalizados (véase **Figura 2.3**), cuyas medidas de separación del entramado en cada malla se presentan en la **Tabla 2.3**. Para la determinación del contenido de humedad de la capirona se ha utilizado el tamaño de partícula MR5 ( $\leq 0,48$  mm).

#### b. Balanza analítica:

El equipo es de la marca METTLER TOLEDO modelo NewClassic ML con una precisión de 0,0001 g y un máximo de 220 g. En la **Figura 2.4**, se puede observar la balanza analítica, la cual también se empleará para pesar los materiales implicados en la fabricación del compuesto y para los ensayos de densidad junto a sus respectivos accesorios, tales como un soporte estacionario para el recipiente de inmersión, un vaso de precipitado de 250 mL, un alambre con canastilla que porte

las muestras a pesar en el aire y sumergido, un lastre de acero inoxidable con un sujetador



a)

b)

**Figura 2.3.** a) Sistema de clasificación de tamaños de partículas, b) tamiz MR2

**Tabla 2.3** Características de las mallas utilizadas en la tamización de la madera

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



a)



b)

**Figura 2.4.** a) Balanza analítica b) balanza y accesorios

**c. Mufla eléctrica:**

La mufla eléctrica trabaja hasta una temperatura de 300 °C y posee una precisión de 1 °C, este horno permitirá determinar el contenido de humedad de la capirona y secar los diversos instrumentos de laboratorio luego de su limpieza (véase **Figura 2.5a**).

**d. Desecador:**

El instrumento de laboratorio de la **Figura 2.5b** está fabricado de un vidrio grueso y tiene dos compartimientos, el superior es el lugar de ubicación de las muestras y el inferior contiene gel sílice. La función del desecador es almacenar muestras, evitando la humedad del ambiente mediante el vacío.

**e. Vaso de precipitado:**

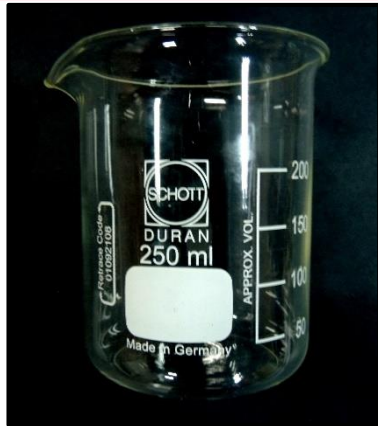
Recipiente cilíndrico de borosilicato empleado para contener la madera capirona durante la extracción de su humedad (véase **Figura 2.6a**).

**f. Termómetro:**

Instrumento con 0,2 °C de precisión que permitirá medir la temperatura del agua en el ensayo de densidad (véase **Figura 2.6b**)



**Figura 2.5.** a) Mufla eléctrica, b) desecador



a)



b)

**Figura 2.6.** a) Vaso de precipitado b) termómetro

#### g. Máquina TGA-IR:

El equipo para el análisis termogravimétrico es el Bruker TGA-IR y se utiliza nitrógeno como gas de purga (véase **Figura 2.7**). Mediante este equipo se obtiene el cambio de masa de la muestra en función de la temperatura.



**Figura 2.7.** Máquina TGA-IR (lado derecho)

#### h. Otros insumos:

- Agua destilada: Utilizado para el ensayo de densidad y absorción de agua.
- Recipiente de plástico: Contenedor las muestras sumergidas en agua.
- Lastre: Peso extra para evitar que la madera flote durante el ensayo de absorción de agua.

## 2.2.2 Determinación de la densidad de la madera

Según la norma ASTM D2395 – 13: Métodos de ensayo para la densidad y gravedad específica (densidad relativa) de madera y materiales a base de madera; y de acuerdo al método de ensayo B – para determinar el volumen por inmersión en agua, el procedimiento de ensayo es el siguiente:

Primeramente, se selecciona 5 muestras de madera capirona, las cuales tienen forma irregular sin ángulos rectos en las esquinas, y se secan en un vaso de precipitado a  $103 \pm 2$  °C por 24 horas. Transcurrido dicho tiempo, se retiran las muestras y se enfrían en un desecador hasta alcanzar la temperatura ambiente (entre 10 y 15 minutos).

Seguidamente, se prepara la balanza analítica con los accesorios y suficiente agua destilada para el ensayo de acuerdo al “Modo III” de la norma (véase **Figura 2.4b**) y se tara la balanza. Después, se determina la masa de la muestra seca en el aire ( $M_{Ma}$ ) y se toma la temperatura del agua.

A continuación, se utiliza un lastre con la finalidad de evitar que la madera flote en el agua, entonces se coloca la muestra y el lastre en la canastilla de alambre, ésta debe estar completamente sumergida sin tocar al recipiente y se registra la masa ( $M_{Ms}$ ). Para terminar, se sumerge el lastre en el agua y se anota su masa ( $M_L$ ).

El valor de la densidad de la madera capirona se calcula mediante la **Ecuación 2.1**:

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

donde:

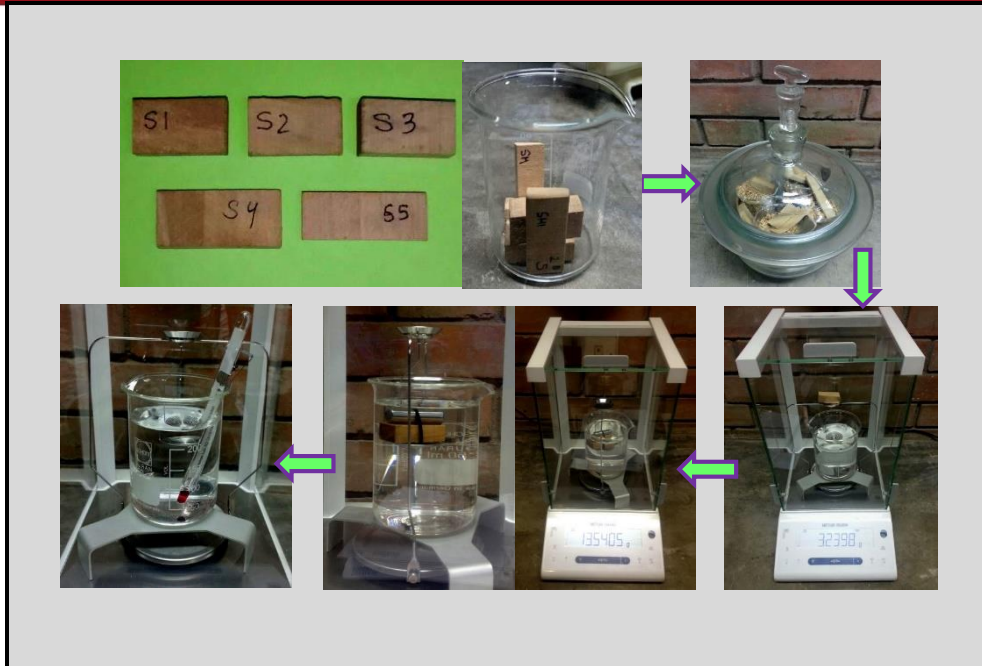
$M_{Ma}$  = Masa aparente de la madera, sin lastre, en el aire (g)

$M_{Ms}$  = Masa aparente de la madera y del lastre completamente sumergidos (g)

$M_L$  = Masa aparente del lastre completamente sumergido (g)

$\rho_{H_2O}$  = Densidad del agua a la temperatura de ensayo (20,8 °C)

En la **Figura 2.8**, se presenta el procedimiento seguido para encontrar el valor de la densidad de la madera capirona.



**Figura 2.8.** Proceso para la determinación de la densidad de la madera: Primero, se secan las muestras durante 24 h a 103 °C; posteriormente, se colocan en el desecador y una vez frío, se pesa la muestra en el aire y sumergida en agua destilada con la ayuda de un lastre. Además, se mide la temperatura del agua para continuar con los cálculos.

### 2.2.3 Determinación del contenido de humedad de la madera

La determinación del contenido de humedad de la madera capirona se desarrolló según la norma técnica ASTM E871 – 82(2013). Para ello, en primer lugar, se lava un vaso de precipitado el cual es ubicado en una mufla a  $103 \pm 1$  °C durante 30 minutos para su respectivo secado y posteriormente se coloca en el desecador para que se conserve a temperatura ambiente. Así, se obtiene el peso del vaso de precipitado vacío ( $W_v$ ), se adiciona aproximadamente 50 gramos de madera capirona MR5 ( $\leq 0,48$ ) y se pesa tanto el recipiente como la muestra de madera, registrándose el peso inicial ( $W_i$ ).

Esta muestra es ubicada en un horno a  $103 \pm 1$  °C durante 16 horas, luego de dicho tiempo es colocada en un desecador para enfriarla hasta la temperatura ambiente y se determina su peso.

Inmediatamente, se lleva el recipiente al horno por 2 h a  $103 \text{ °C} \pm 1 \text{ °C}$ , se coloca en el desecador y se pesa. Se repite el procedimiento mencionado anteriormente

hasta que el cambio de peso total entre pesajes varíe menos de 0,2% y se registra éste como el peso final ( $W_f$ ).

Finalmente, mediante la **Ecuación 2.2**, se realiza los cálculos para determinar el contenido de humedad de la capirona y se repite el ensayo con otras muestras para obtener más datos. En la **Figura 2.9** se puede observar el procedimiento seguido durante el ensayo de humedad de la madera.

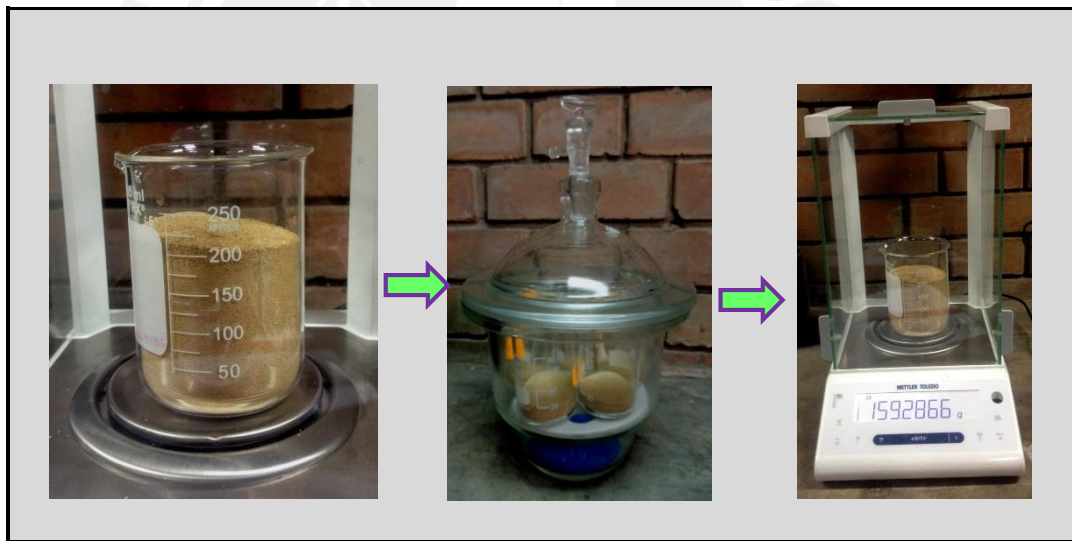
$$\% H_{MC} = \frac{W_i - W_f}{W_i - W_v} \times 100 \quad (2.2)$$

donde:

$W_v$  = Peso del vaso de precipitado vacío (g)

$W_i$  = Peso inicial (g)

$W_f$  = Peso final (g)



**Figura 2.9.** Proceso para la determinación del contenido de humedad de la MC: Pesaje de una muestra de aprox. 50 g y secado durante 16h a 103 °C, se coloca en el desecador y luego se pesa (proceso repetitivo).

#### 2.2.4 Ensayo de absorción de agua de la madera

El ensayo de absorción de agua de la capirona se lleva a cabo bajo la norma técnica ASTM D 1037 - 06a: Métodos de ensayo B.

Para empezar, se obtienen 5 muestras y se procede a secar a  $103 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  durante 24 h para retirar la humedad presente en la madera. Seguidamente se colocan las muestras en el desecador y una vez que se encuentren a temperatura ambiente, estas son pesadas y se registra el valor de  $W_{Ms}$ . Posteriormente se sumergen horizontalmente todas las muestras bajo 25 mm de agua destilada durante 24 horas; por tanto, se utiliza un peso extra para que las muestras no floten. Finalmente, cada muestra es pesada y se registra el valor de  $W_{Ma}$  (véase **Figura 2.10**).

Es importante mencionar que el ensayo fue realizado en condiciones ambientales: temperatura igual a  $20 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$  y humedad relativa  $75 \pm 5 \%$ . Por tanto, La absorción de agua encontrada en la capirona se calcula mediante la **Ecuación 2.3**, posterior a que la muestra haya sido sumergida de forma continua y por única vez durante 24 h.

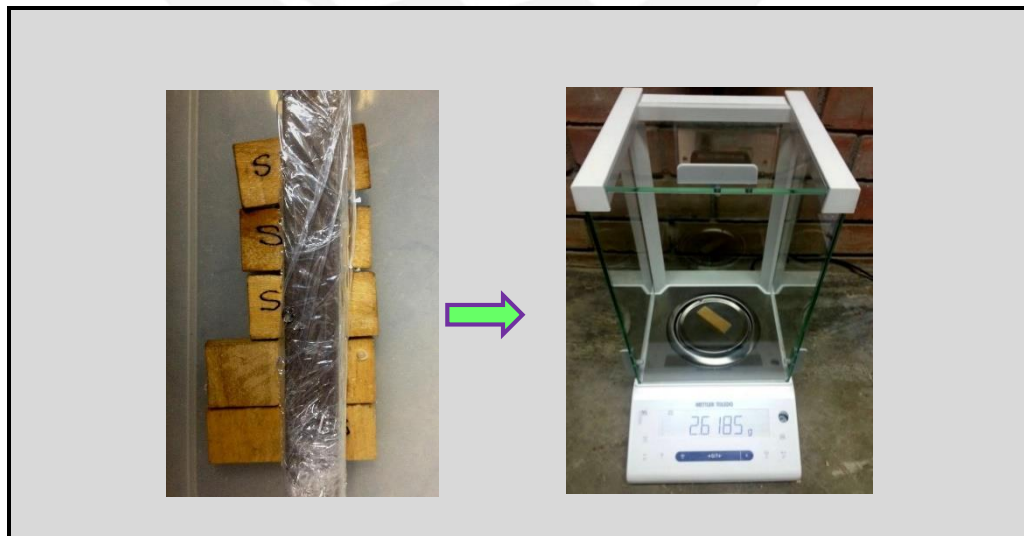
$$A_{MC}(\%) = \frac{W_{Ma} - W_{Ms}}{W_{Ms}} \times \rho_{H_2O} \quad (2.3)$$

donde:

$W_{Ms}$  = Peso de la madera seca (g)

$W_{Ma}$  = Peso de la madera después de 24 h de inmersión en agua (g)

$A_{MC}(\%)$  = Porcentaje de absorción de agua de la capirona



**Figura 2.10.** Proceso seguido para el ensayo de absorción de agua de la MC: las muestras de madera se secan y luego son sumergidas en agua por 24h y finalmente se pesan.

### 2.2.5 Análisis termogravimétrico (TGA) de la madera

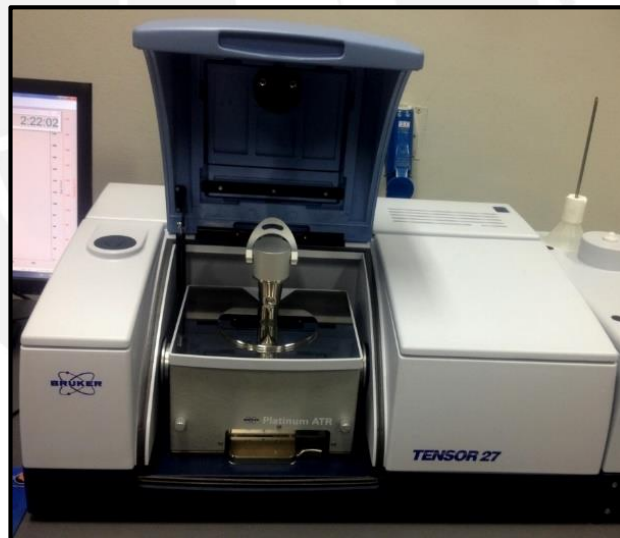
El análisis se realiza según la norma ASTM E1131 - 08(2014). Para ello, se pesa entre 10 – 20 mg de muestra y se trabaja en un rango de temperaturas de 25 a 600 °C, a una velocidad de 10 °C/min. Estos parámetros de ensayo se encuentran dentro del rango recomendado por la norma y, además, se corrobora con investigaciones anteriores realizadas por Rieb (2005) y AIMaadeed (2012). La atmósfera inerte es de nitrógeno y se encuentra a un caudal de 50 mL/min.

## 2.3 Caracterización del polipropileno virgen y reciclado

### 2.3.1 Equipos empleados

#### a. Equipo FTIR-ATR:

El análisis de FTIR se realiza con un espectrómetro de infrarrojo por transformada de Fourier de tensor 27 de la marca Bruker (véase **Figura 2.11**), el cual posee el accesorio de atenuación total de reflectancia (ATR Platinum).



**Figura 2.11.** Equipo FTIR-ATR

#### b. Equipo de IFM

El medidor del índice de fluidez Zwick/Roell Cflow es un equipo de fácil manipuleo, el cual permite el control rápido del índice de fluidez en masa (IFM) del polímero. El diseño del aparato permite una buena distribución de la temperatura en el canal de ensayo y junto a sus respectivos accesorios permite el proceso adecuado y la limpieza del equipo (véase **Figura 2.12**),



a)

b)

**Figura 2.12** a) Equipo del IFM b) accesorios del equipo

**c. Máquina DSC:**

El calorímetro diferencial Júpiter STA 449 F3 - Netzsch trabaja con atmósferas inertes controladas en un rango de temperaturas entre  $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $2400\text{ }^{\circ}\text{C}$  (véase **Figura 2.13**),

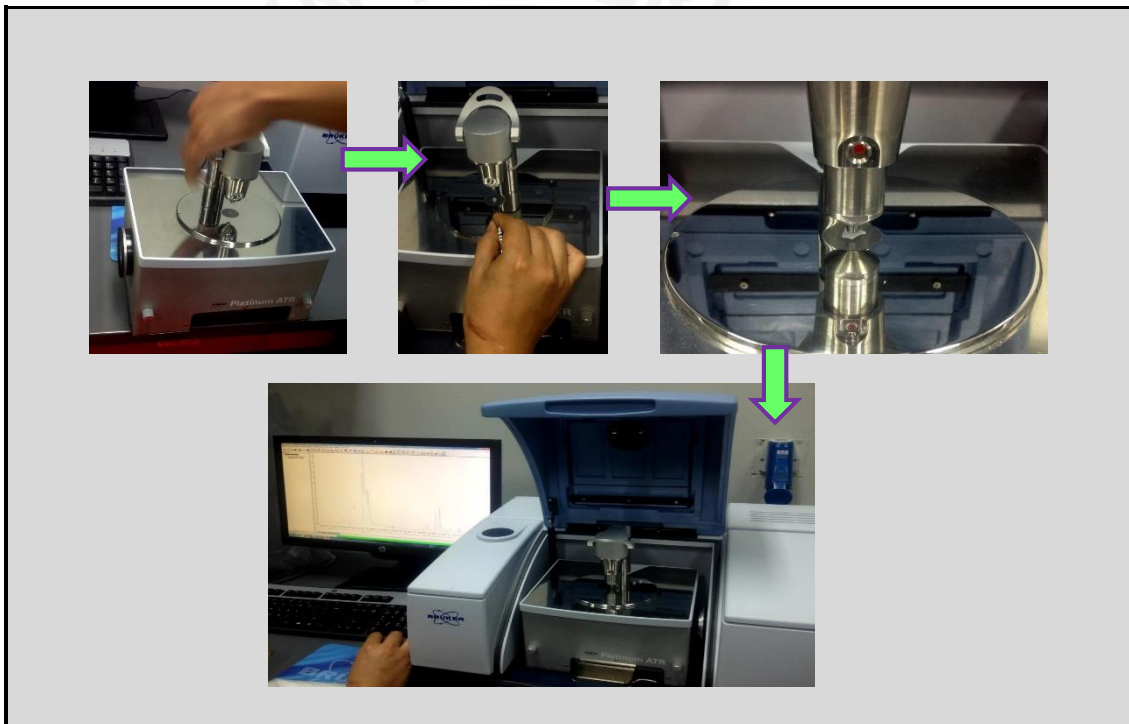
Los datos del análisis térmico se obtienen mediante un software compatible con el sistema operativo Windows.



**Figura 2.13.** Máquina DSC

### 2.3.2 Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR-ATR)

Este ensayo tiene como finalidad verificar si el material dado para la investigación es PP, esto se lleva a cabo mediante el análisis de los grupos funcionales presentes en el polímero. Para ello, en primer lugar, se realiza la limpieza del accesorio de atenuación total de reflectancia de diamante y se coloca en esta la muestra del plástico. Los parámetros de ensayo son los siguientes: rango de número de onda de  $4000\text{ cm}^{-1}$  a  $500\text{ cm}^{-1}$ , resolución de  $4\text{ cm}^{-1}$  y 8 barridos. Finalmente, mediante un software, se puede observar el espectro obtenido a partir del ensayo. En la **Figura 2.14** se puede observar el procedimiento seguido para el ensayo de FTIR del PP-virgen y reciclado.



**Figura 2.14.** Proceso para el ensayo de FTIR-ATR del PP: limpieza del equipo, colocación de la muestra PP y análisis de resultados

### 2.3.3 Índice de fluidez (IFM)

Para determinar el índice de fluidez del plástico se utiliza la norma ASTM D1238 – 13 (procedimiento B), en la cual se identifica las condiciones de ensayo para el polímero; por lo tanto, para el polipropileno (PP), la temperatura de ensayo es  $230 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  y la carga es 2,16 kg. En primer lugar, se verifica que el equipo esté libre de

residuos de pruebas anteriores; seguidamente, se calienta el equipo hasta la temperatura de ensayo y se pesa entre 3 a 5 g de material. Posteriormente, cuando el equipo alcance los 230 °C, las partículas de PP se introducen en el cilindro de calentamiento y éstas deben precalentarse por al menos 200 s. Transcurrido dicho tiempo, el material pasa por un dado por efecto de la carga aplicada sobre el fluido. Así, cada 70 segundos se extruye una cierta cantidad de masa (una tira), cuya longitud abarca entre 5 y 7 cm. Finalmente, se pesa la masa extruida y se obtiene el índice de fluidez al dividir ambos valores (masa y tiempo).

En la **Figura 2.15** se observa el procedimiento para la determinación del índice de fluidez del PP-virgen y reciclado.



**Figura 2.15.** Proceso para la determinación del índice de fluidez del PP

### 2.3.4 Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

Este ensayo se ejecuta de acuerdo a la norma ASTM D3418 - 12 y tiene la finalidad de determinar la temperatura de fusión, temperatura de transición vítrea, entre otros. Para ello, la muestra de PP debe ser preparada con un cincel para darle forma circular y se colocan en un pan de aluminio. Seguidamente, se configura el equipo con los parámetros de dos calentamientos y un enfriamiento, tal y como se observa en la **Tabla 2.4**. Así, se introduce la muestra de aproximadamente 5 - 15

mg en el equipo y se trabaja en un rango de temperaturas de -50 a 300 °C a una velocidad de calentamiento y enfriamiento de 10 °C/min. El gas de purga es el nitrógeno a un flujo de 50 mL/min.

**Tabla 2.4** Parámetros de ensayo para el DSC

Pasos	Temperaturas (°C)
Primer Calentamiento	25 a 300
Primer enfriamiento	300 a -50
Segundo Calentamiento	-50 a 300

### 2.3.5 Análisis termogravimétrico (TGA)

El análisis termogravimétrico del PP se realiza según la norma ASTM E1131 - 08(2014) y se utiliza los parámetros de ensayo mencionados en el apartado 2.2.5

## 2.4 Diseño experimental

La investigación se divide principalmente en 2 partes.

La *Parte Experimental I* tiene el objetivo de encontrar los parámetros del proceso de sinterizado, tanto temperatura como tiempo, del material compuesto fabricado a partir de capirona y polipropileno reciclado. Para ello, se mantendrá constante un tamaño de partícula de madera ( $\leq 3,33$  mm) para muestras de una misma proporción en volumen de plástico y madera (70% y 30% respectivamente) y de esta manera variar la temperatura de trabajo y el tiempo de permanencia de la muestra en el horno a dicha temperatura. La temperatura de trabajo debe evaluarse dentro del rango de fusión del polipropileno reciclado (PPR) y a tiempos menores. No obstante, la temperatura empleada no debe exceder el rango de temperaturas de degradación de la madera (aprox. 200 – 220 °C), puesto que podría perjudicar las propiedades del material compuesto.

De acuerdo a la norma ISO 17025, el número mínimo de repetitividad recomendado en una investigación es de 3 muestras. Por lo tanto, para la *Parte I*, se ha considerado fabricar 3 muestras de material compuesto para una misma temperatura, tiempo, tamaño y proporción de partículas. Por lo que se pretende fabricar muestras a 3 temperaturas y 5 periodos de tiempo, obteniendo un total de 45 muestras (véase **Tabla 2.5**). De esta manera, por cada muestra se obtendrán 2

probetas para el ensayo de flexión con un total de 6 probetas para analizar por cada variante. Con éstos resultados se pretende encontrar la temperatura y tiempo de sinterizado para el material compuesto a partir de polipropileno y madera capirona.

**Tabla 2.5** Cantidad de muestras totales para el ensayo de moldeo del CPM (*Parte I*)

Proporción	Tamaño de partícula	Temperatura	Tiempo	Repetitividad	#Total de muestras
1	1	3	5	3	45

En la *Parte Experimental II* de la investigación, se utilizará la temperatura y tiempo de trabajo óptimos encontrados en la *Parte I* y se variará el tamaño de partículas de madera y la proporción en volumen de los materiales. Por tanto, considerando que un propósito de esta investigación es comparar los resultados de propiedades mecánicas y térmicas del material compuesto sinterizado, se determinó realizar 5 muestras, considerándose 3 diferentes porcentajes de constituyentes del material compuesto y 3 tamaños de partículas; además de ello, se fabricarán 5 muestras del PPR-puro, generando un total de 50 muestras (Ver **Tabla 2.6**).

**Tabla 2.6** Cantidad de muestras a fabricar del material compuesto (*Parte II*)

Componentes		Número de muestras a obtener		
%PPR	%MC	MR1	MR2	MR3
100	0	5 (plástico puro)		
70	30	5	5	5
60	40	5	5	5
50	50	5	5	5

## 2.5 Fabricación de muestras del material compuesto a partir de polipropileno y partículas de madera capirona

### 2.5.1 Equipos empleados

#### a. Horno eléctrico:

El horno utilizado ha sido diseñado con un sistema de calentamiento conformado por 6 resistencias (cada una de 2 kW) ubicadas en las paredes laterales internas

(véase **Figura 2.16**). Además, cuenta con un sistema de ventilación en la parte posterior, el cual permite distribuir el calor homogéneamente por todo el horno. En la **Tabla 2.7** se presentan las características del horno.

**Tabla 2.7** Características generales del horno

Característica	Fuente	Valor	Unidad
Temperatura máxima de servicio	-	450	°C
Generación de calor	6 resistencias eléctricas	12	kW
Voltaje	-	220/380	V
Dimensiones	-	1000 x 900 x 450	mm



**Figura 2.16.** a) Parte externa del horno b) parte interna del horno

### b. Prensa hidráulica:

La prensa hidráulica, presentada en la **Figura 2.17**, cuenta con un pistón hidráulico, el cual ejerce la fuerza sobre el vástago para aplicarla a la muestra del material compuesto fabricado. La prensa fue diseñada con una carga nominal de 100 toneladas y cuenta con una mesa de trabajo amplia que facilita la manipulación del sistema de moldeo. Además, posee dos manómetros los cuales indican la presión ejercida sobre la muestra elaborada. El cilíndrico hidráulico tiene un diámetro de 250 mm, el diámetro del vástago es de 160 mm, y la carrera máxima es de 500 mm.

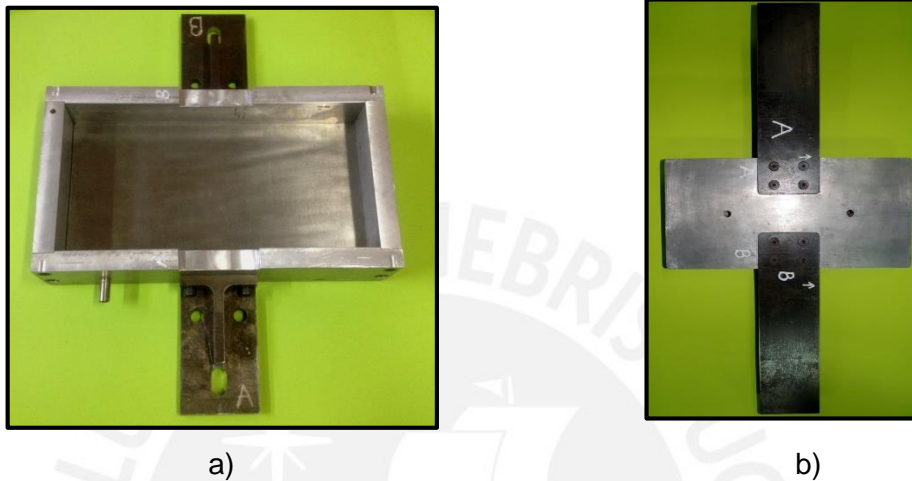


**Figura 2.17.** Prensa hidráulica

### c. Moldes:

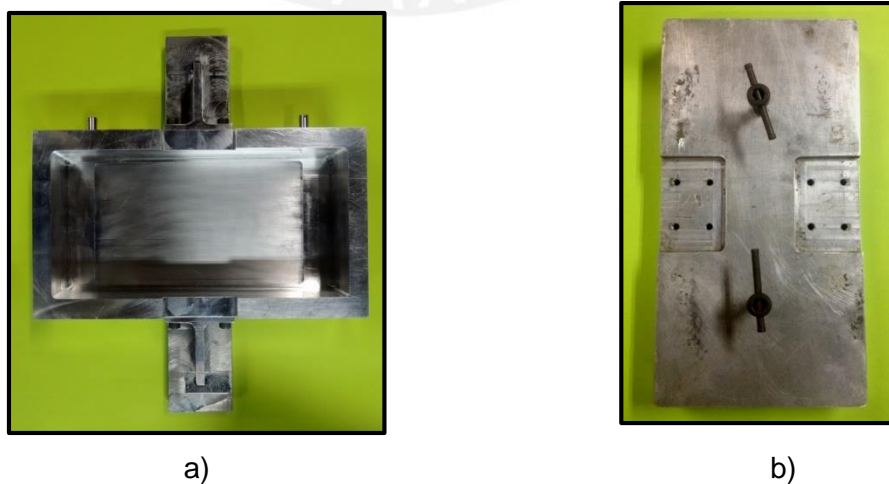
Durante la investigación se han utilizado dos moldes los cuales permiten obtener muestras planas rectangulares de 300 x 150 mm. El “molde A” ha sido empleado en la *Parte I* para la fabricación de muestras a diferentes temperaturas y tiempo de trabajo, con la finalidad de determinar los parámetros de fabricación del material compuesto. El “molde B” se ha utilizado para la *Parte II* de la investigación, permitiendo la fabricación de muestras a una determinada temperatura ( $T_w$ ) y tiempo de trabajo ( $t_w$ ) con la variación del % en volumen de plástico y madera, y tamaño de partículas de madera. A continuación, se presenta las principales características de los moldes:

- Molde A: Las paredes laterales y la base del molde son de aluminio y están unidas mediante pernos allen M10, con un total de 18 pernos. Internamente, en la parte inferior, cuenta con una placa de acero inoxidable el cual permite la extracción de la muestra del material compuesto. La tapa del molde es de alumold, tiene unas aletas que permite ser retirada antes de la extracción de la muestra (véase **Figura 2.18**).



**Figura 2.18.** a) “Molde A” con la placa de extracción, b) tapa del “molde A”

- Molde B: Este molde ha sido diseñado y fabricado para optimizar el sistema de moldeo. El molde es de una sola pieza de alumold, lo cual evita que se genere una mayor cantidad de rebabas. La placa de extracción de alumold forma parte de la base del molde. La tapa es similar a la del “Molde A” con la modificación de los redondeos en las esquinas y en lugar de las aletas lleva 2 asas que permiten el fácil manipuleo (véase **Figura 2.19**).

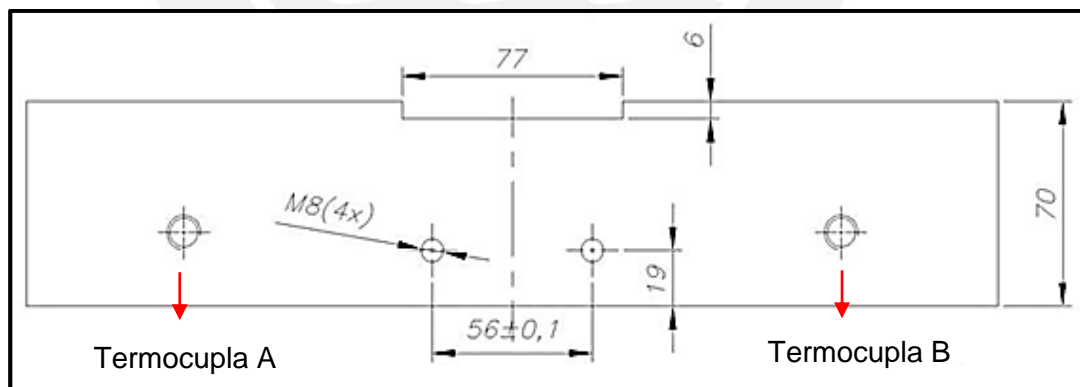


**Figura 2.19.** a) “Molde B” con la placa de extracción, b) tapa del “molde B”

Cabe resaltar que los moldes tienen dos agujeros en la parte inferior; ya que, se pretende colocar un adaptador para las termocupas (véase **Figura 2.20**). Estos sensores tipo J poseen un resorte y bayoneta, los cuales permiten medir la temperatura del molde (véase **Figura 2.21**); es decir, se podrá controlar la temperatura del molde de alumold y es aquella la temperatura ( $T_w$ ) que se considera para la fabricación del CPM. Sin embargo, se debe tomar en cuenta, que la temperatura en el centro de la muestra es diferente a la medida; puesto que, la termocupla se encuentra a una distancia de aproximadamente 3 mm de la pared interna del molde; así, la  $T_w$  en el compuesto es alcanzada durante un tiempo mediante la transferencia de calor.



**Figura 2.20.** Sensor de temperatura



**Figura 2.21.** Vista de perfil del molde B: se observa la posición de la termocupla

#### d. Sistema de extracción

El sistema de extracción posee tres funciones: Soporta la presión que se origina durante el compactado de la muestra; retira la tapa del molde y; finalmente, permite expulsar la muestra del material compuesto del molde mediante unos pines

extractores o botadores. Adicionalmente, se cuenta con dos utilajes que se encargan de sujetar al molde durante la extracción de la tapa y la muestra (véase **Figura 2.22**).



**Figura 2.22.** Sistema de extracción

#### e. Sistema de transporte

El Sistema de transporte permite desplazar el molde y la tapa a las diferentes estaciones del sistema: Horno (calentamiento), prensa hidráulica (compresión) y estación de carga/descarga. El sistema de transporte fue diseñado para poder soportar una carga de 100 kg (véase **Figura 2.23**).

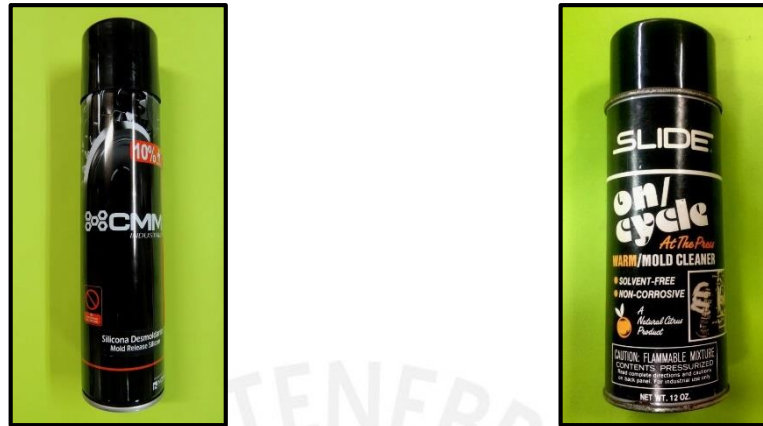


**Figura 2.23.** Sistema de transporte de molde

#### f. Otros insumos

- Desmoldante: El desmoldante de silicona en aerosol es de la marca CMM-Industrial, el cual es efectivo en temperaturas entre  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $260^{\circ}$  y evita que la muestra se trabe en el molde, es altamente efectivo en moldeo por compresión.

- Limpiador de molde: El limpiador On/Cycle Mold cleaner de la marca SLIDE permite remover fácilmente las acumulaciones de plástico u otros residuos.



a)

b)

Figura 2.24. a) Desmoldante b) limpiador del molde

### 2.5.2 Determinación de la cantidad de partículas de madera capirona y plástico:

Se determina la cantidad de partículas de madera capirona (MC) y plástico (PP) mediante las Ecuaciones 2.4, 2.5 y 2.6.

$$W_{MC} = V_{Tm} \times \left[ \frac{(\%V_{MC})}{100} \right] \times \rho_{MC} \quad (2.4)$$

$$W_{PP} = V_{Tm} \times \left[ \frac{(\%V_{PP})}{100} \right] \times \rho_{PP} \quad (2.5)$$

$$W_t = W_{MC} + W_{PP} \quad (2.6)$$

donde:

$W_{MC}$ : Peso de la madera capirona para una muestra (g)

$W_t$ : Peso total de la muestra de polipropileno y madera capirona (g)

$V_{Tm}$ : Volumen total de una muestra a fabricar (cm<sup>3</sup>)

$\%V_{MC}$ : Fracción del volumen de las partículas de madera capirona (%)

$\rho_{MC}$ : Densidad de la madera capirona (g/cm<sup>3</sup>) = 0,736 g/cm<sup>3</sup>

$W_{PP}$ : Peso de polipropileno (g)

$\%V_{PP}$ : Fracción del volumen del polipropileno (%)

$\rho_{PP}$ : Densidad del polipropileno (g/cm<sup>3</sup>) = 0,91 g/cm<sup>3</sup> (Dato de hoja técnica)

Es necesario conocer que la muestra final debe ser un paralelepípedo con dimensiones aproximadas de 300 x 150 x 10 mm.

### 2.5.3 Selección y pesaje de partículas de MC y PPR

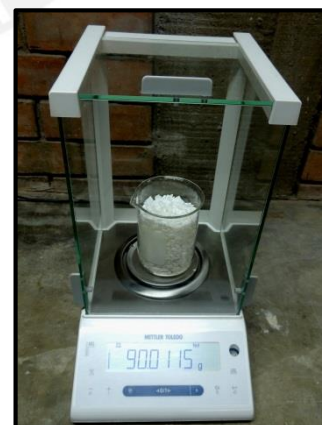
Después de obtener la madera picada y de seleccionarla mediante tamices de diferentes tamaños de malla como MR1, MR2 y MR3, se realiza el cálculo de la cantidad de material a utilizar (véase **Tabla 2.8**) según las **Ecuaciones 2.4, 2.5 y 2.6**. Para ello, se considera como  $V_{Tm}$  un paralelepípedo con la longitud (30 cm) y ancho (15 cm) mencionados anteriormente, pero con un espesor de 1,1 cm por la presencia de rebabas durante el proceso de compresión. De esta manera, los valores de cantidades de plástico y madera pesados en la balanza analítica para su posterior mezclado (véase **Figura 2.25**).

**Tabla 2.8** Determinación del peso de la madera y polipropileno para la muestra

%V <sub>PP</sub>	%V <sub>MC</sub>	V <sub>Tm</sub> (cm <sup>3</sup> )	$\rho_{PP}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{MC}$ (g/cm <sup>3</sup> )	W <sub>PP</sub> (g)	W <sub>MC</sub> (g)	e (cm)
70	30	495	0,91	0,736	315,32	109,30	1,1
60	40	495	0,91	0,736	270,27	145,73	1,1
50	50	495	0,91	0,736	225,23	182,16	1,1
40	60	495	0,91	0,736	180,18	218,59	1,1
30	70	495	0,91	0,736	135,14	255,02	1,1



a)



b)

**Figura 2.25.** a) Pesaje de la capirona, b) pesaje del polipropileno reciclado

#### 2.5.4 Mezclado y homogenizado de partículas de MC recuperada y PP reciclado

En un recipiente se mezclan las partículas de ambos materiales y se procede a agitar durante 2 minutos (véase **Figura 2.26**) buscando una mezcla homogénea.



**Figura 2.26.** a) Inicio del mezclado, b) Mezcla homogénea

#### 2.5.5 Limpieza del molde y aplicación del desmoldante

Con la finalidad de facilitar la extracción de la muestra del material compuesto, el molde se limpia, se coloca en el sistema de transporte y se aplica el desmoldante de silicona en emulsión (aerosol) sobre las paredes internas del molde y la cara inferior de la tapa (véase **Figura 2.27**).

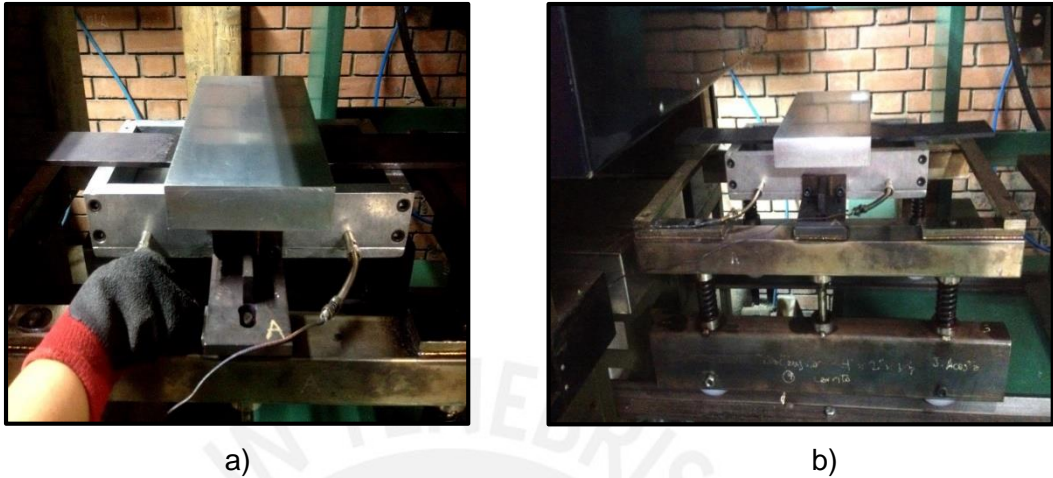


**Figura 2.27.** Aplicación del desmoldante

#### 2.5.6 Pre calentamiento del molde

En esta etapa el molde es pre calentado hasta una temperatura de alrededor de 190°C, lo cual permitirá disminuir el tiempo de calentamiento de la mezcla en el

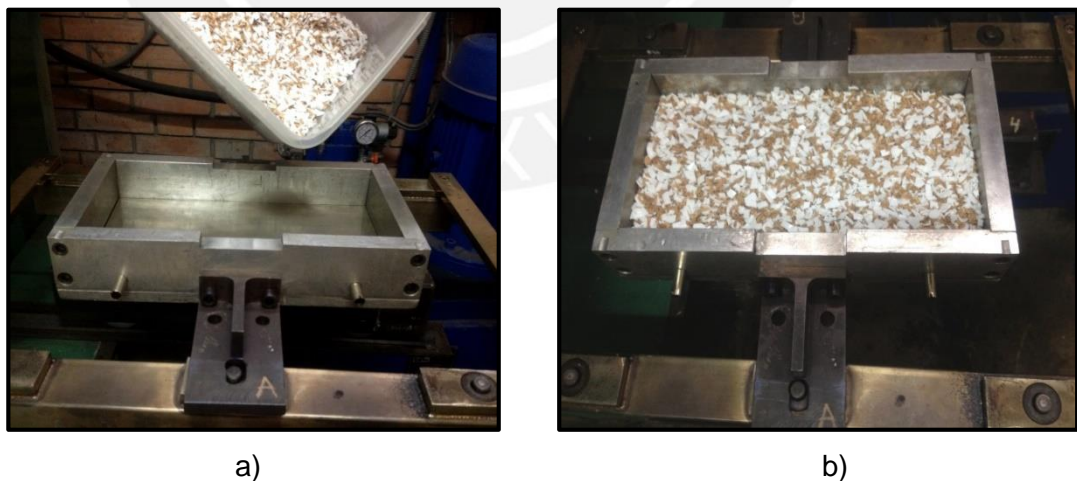
horno. El control de dicha temperatura se realiza mediante un sistema electrónico adjunto al horno y para ello se coloca un sensor en el molde antes de su ingreso (véase **Figura 2.28**).



**Figura 2.28.** a) Colocación de las termocuplas, b) Ingreso del molde al horno

### 2.5.7 Carga de la mezcla en el molde precalentado

Seguidamente, se retira el molde del horno y las termocuplas; posteriormente, se deposita la mezcla en el interior del molde precalentado, tratando de que sea homogénea y se coloca la tapa (véase **Figuras 2.29** y **2.30**).



**Figura 2.29.** a) Colocación de la mezcla, b) mezcla homogénea en el molde



a)

b)

**Figura 2.30.** a) Colocación de la tapa del molde, b) molde con la mezcla cubierta

### 2.5.8 Calentamiento a la temperatura de trabajo de la mezcla

Mediante el uso del sistema de transporte, el molde se traslada al sistema de calentamiento - horno eléctrico y se colocan las termocuplas (véase **Figura 2.31** y **2.32**). El molde debe permanecer a la temperatura durante el tiempo de trabajo.



**Figura 2.31.** Traslado del molde hacia el horno y colocación de termocuplas



**Figura 2.32.** Ingreso del molde al horno con la mezcla de plástico y madera

### 2.5.9 Prensado y enfriamiento del molde

Después de cumplir con los parámetros de fabricación, se retira el molde del horno y se extrae el sensor de temperatura. Seguidamente, el molde se traslada hacia la prensa hidráulica, se centra con los pines de extracción y se aplica una fuerza de compresión de 70 bar durante 10 minutos (véase **Figura 2.33**) y a la vez se ejecuta la etapa de enfriamiento.



**Figura 2.33.** Inicio del prensado

### 2.5.10 Extracción de la muestra del molde

Por último, se extrae la muestra empleando el sistema de extracción; es decir, los botadores encajan con la placa de extracción del molde y éste es levantado por la prensa (véase **Figura 2.34**)



**Figura 2.34.** Extracción de la muestra

### 2.5.11 Rotulado de muestras

Finalmente, una vez fría la muestra, se retira las rebabas y se etiquetan las muestras de acuerdo a las variaciones existentes en el proceso de fabricación, tales como la temperatura y tiempo de trabajo (*Parte I*); y tamaño y cantidad en volumen de las partículas de madera (*Parte II*), con el propósito de no confundir las muestras y facilitar la organización de estas durante los ensayos (véase **Figura 2.35**).



**Figura 2.35.** a) Muestra del CPM final, b) grupo de muestras rotuladas

A continuación se presenta el código empleado en el rotulado de las muestras:

Código de la muestra:

CPM PPMC 7030MR2	190	30	1	A/B
------------------	-----	----	---	-----

dónde:

- CPM : compuesto de plástico y madera
- PP : polipropileno reciclado
- MC : partículas de madera capirona
- MR2 : malla pasante 2
- 70 : cantidad de polipropileno (%V)
- 30 : cantidad de partículas de capirona (%V)
- 190 : temperatura de trabajo (°C)
- 50 : tiempo de trabajo (min)
- 1 : número de réplica
- A ó B : perteneciente a la misma muestra

## 2.6 Fabricación de las probetas de las muestras obtenidas del material compuesto

Para determinar las propiedades importantes del material compuesto se fabrican y ensayan las probetas de acuerdo a las normas ASTM; por tanto, en la **Tabla 2.9** se especifica cada una de ellas.

**Tabla 2.9** Probetas y ensayos realizados según normas ASTM

Tipo de ensayo	Norma Técnica
Flexión	ASTM D 1037 – 06a
Tracción	ASTM D 1037 – 06a
Impacto	ASTM D 6110 – 05a
Densidad	ASTM D 792 – 13
Absorción de agua	ASTM D 1037 – 06a

### 2.6.1 Equipos y herramientas

#### a. Sierra de cinta:

La sierra de cinta vertical SSF 350 de la marca Mössner Rekord posee una mesa de trabajo de 600 x 500 mm y una altura disponible para la pieza de trabajo de 300 mm (véase **Figura 2.36**). Con dichas características permite cortar varias de las muestras del material compuesto al mismo tiempo.



**Figura 2.36.** Sierra de cinta

**b. Máquina de control numérico por computadora (CNC):**

El centro de mecanizado vertical MAZAC VTC-16 con control numérico MAZATROL M PLUS trabaja con el software de diseño Surfcam y cuenta con un cambiador automático de herramientas (véase **Figura 2.37**). Para el mecanizado de probetas se emplea una fresa con insertos ( $\varnothing 50$ ) y una fresa espiga ( $\varnothing 32$ ).



**Figura 2.37.** Centro de mecanizado vertical con control numérico

**c. Fresadora de entalla:**

La fresadora de entalla Zwick/Roell ZNO sirve para entallar las probetas para el ensayo de impacto Charpy de acuerdo a la norma ASTM D 6110 (véase **Figura 2.38a**). En lugar de utilizar una entalladora manual, ésta permite un ajuste gradual de velocidad de corte y avance, obteniéndose una mejor precisión en las dimensiones de las entallas.

**d. Vernier digital:**

Instrumento de medición con un rango de medición entre 0-150 mm y una precisión de 0,01 mm (véase **Figura 2.38b**).



a)

b)

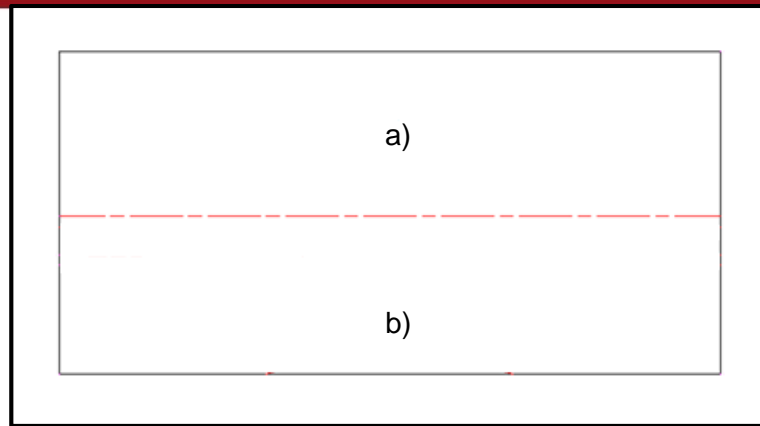
**Figura 2.38.** a) Fresadora de entalla, b) vernier digital

## 2.6.2 Procedimiento de corte de las muestras del material compuesto

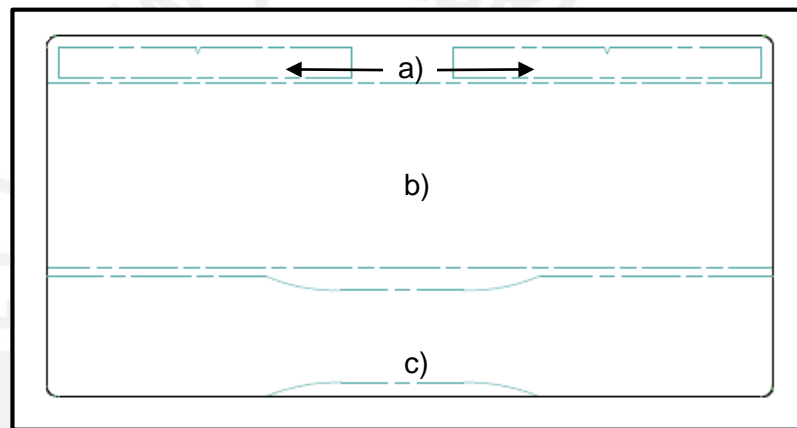
De acuerdo a la *Parte experimental I*, se fabrican probetas de flexión a partir de la muestra de material compuesto; es decir, se obtiene dos probetas de flexión por cada muestra (véase **Figura 2.39**). Por otro lado, para la *Parte experimental II*, se mecaniza dos probetas de impacto, una de flexión y una de tracción (véase **Figura 2.40**); además, a partir de las dos probetas de impacto ensayadas se obtienen cuatro probetas para el ensayo de densidad y absorción de agua.

Por tanto, previamente a la fabricación de cada probeta, con el uso de una cuchilla y lijas se retira los excedentes de cada muestra (150 x 300 x 10 mm) con la finalidad de presentar una superficie plana en todas las caras. Seguidamente, mediante un vernier digital se verifica el espesor de las muestras, cuyo valor es cercano a 10 mm.

Con una sierra de cinta, se realiza el proceso de corte a las dimensiones cercanas con un exceso para su posterior mecanizado y cumplimiento de las tolerancias especificadas en cada norma (véase **Figura 2.41**, **2.42** y **2.43**).



**Figura 2.39.** Distribución de las probetas de flexión (a y b) para las muestras obtenidas en la “*Parte Experimental I*”



**Figura 2.40.** Distribución de las probetas para las muestras obtenidas en la “*Parte Experimental II*”: a) Probetas de impacto, b) probeta de flexión, c) probeta de tracción



a)



b)

**Figura 2.41.** Probetas de la *Parte experimental I*: a) corte mediante la sierra de cinta, b) Probetas de flexión después del corte



a)



b)

**Figura 2.42.** Probetas de la *Parte experimental II*: a) corte mediante la sierra de cinta de la sección para la probeta de impacto, b) corte de la sección para la probeta de tracción



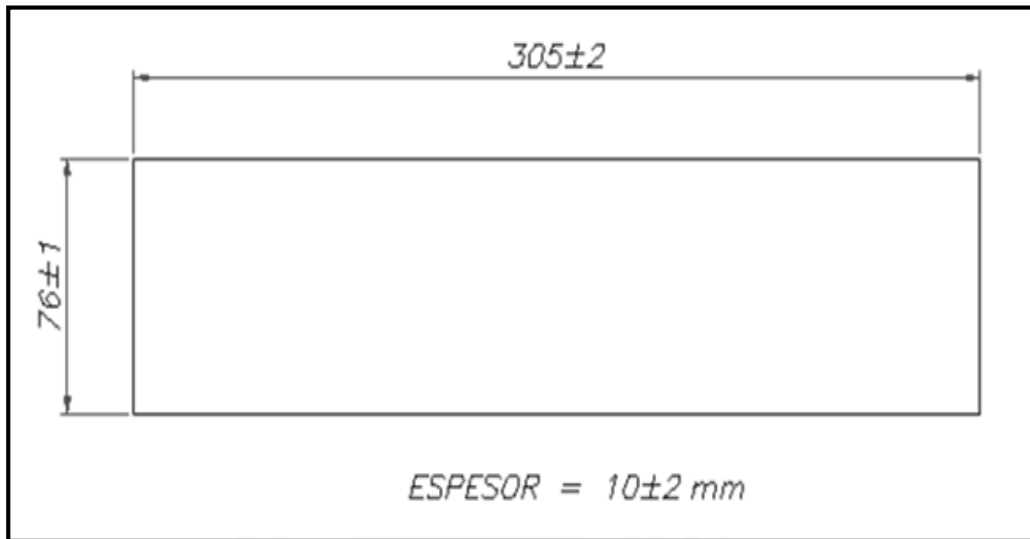
**Figura 2.43.** Secciones cortadas para las probetas de la *Parte II*

### 2.6.3 Procedimiento de fabricación de probetas para el ensayo de flexión

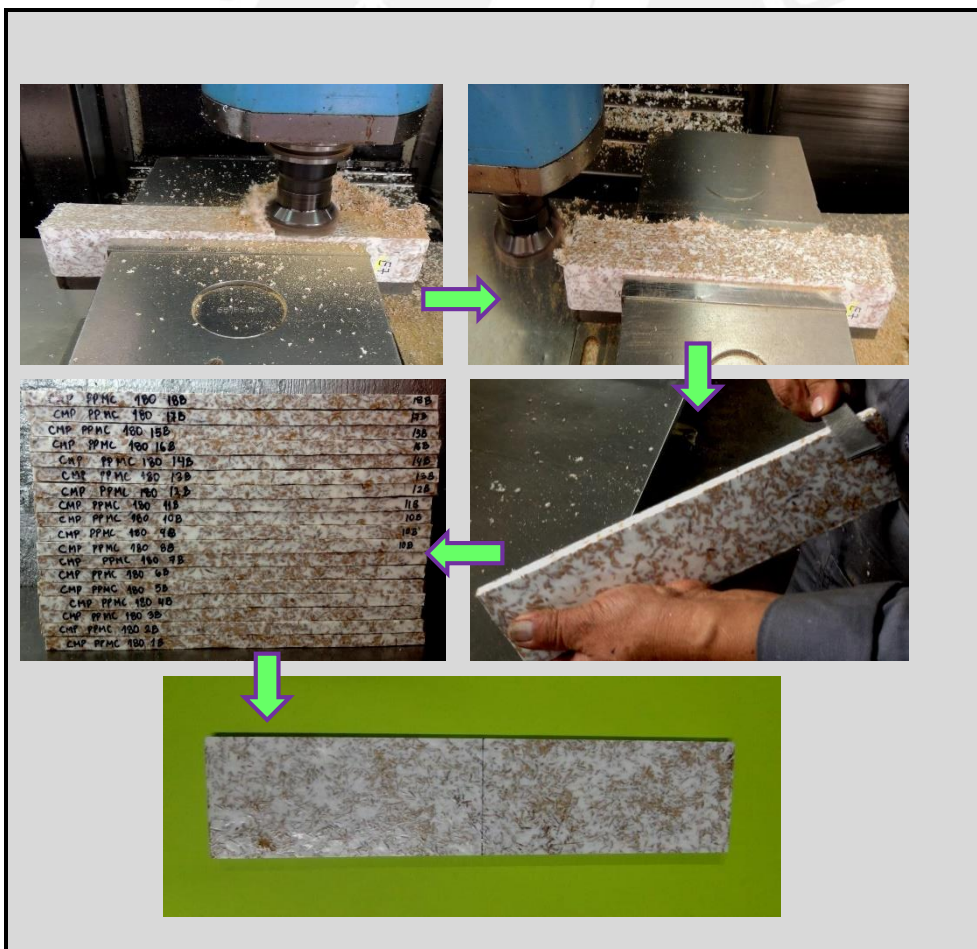
Para conseguir las dimensiones de las probetas de flexión especificadas en la norma ASTM D 1037 – 06a (véase **Figura 2.44**) se procede a mecanizar la muestra cortada en el CNC con una fresa con insertos ( $\varnothing 50$ ) a una velocidad de 1000 rpm. Por consiguiente, la probeta final presenta un ancho de  $76 \pm 1$  mm y un largo mínimo de 51 mm más 24 veces el espesor nominal.

Por último, se lija los restos de material y con el uso de un vernier digital se mide y se registra el ancho y espesor de la sección transversal en el centro de la probeta y

se marca el punto de aplicación de la carga. En la **Figura 2.45**, se puede notar el proceso seguido para la producción de las probetas de flexión.



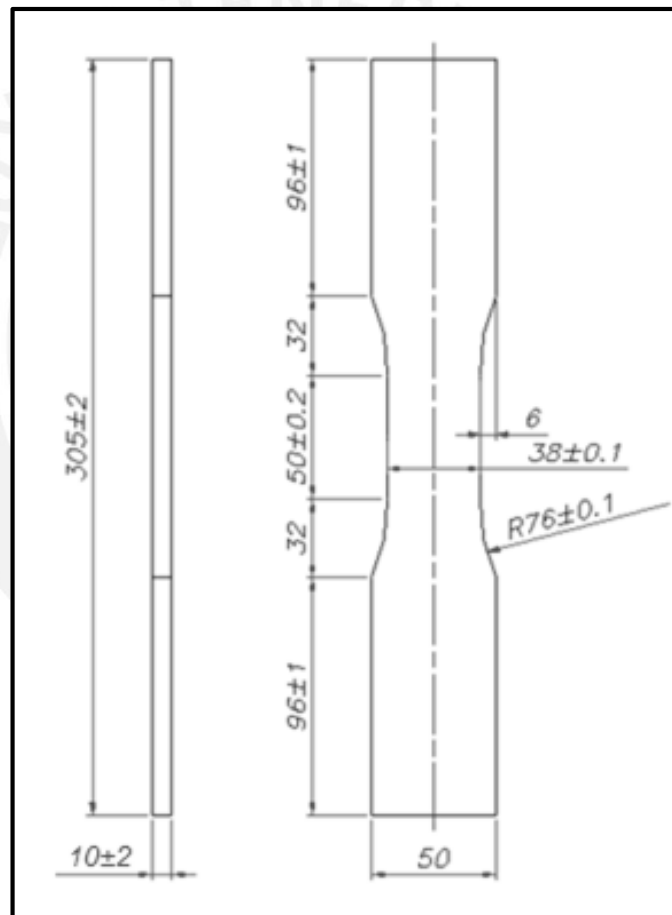
**Figura 2.44.** Dimensiones de la probeta de flexión según ASTM D 1037 – 06a



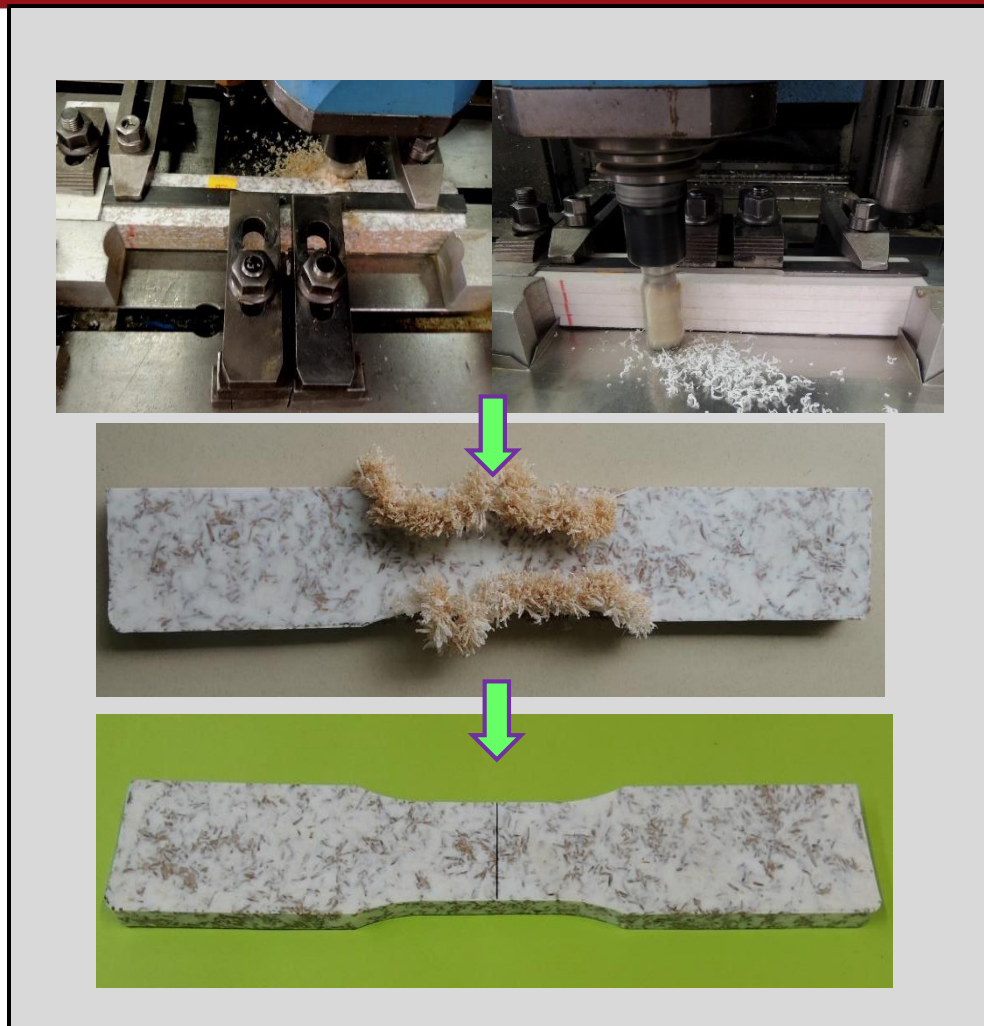
**Figura 2.45.** Proceso de fabricación de las probetas de flexión

#### 2.6.4 Procedimiento para la fabricación de probetas para el ensayo de tracción

De acuerdo a la norma ASTM D 1037 – 06a, las probetas de tracción deben tener las dimensiones presentadas en la **Figura 2.46**. Para alcanzar las tolerancias finales, se mecaniza la muestra en el CNC con la misma herramienta utilizada en las probetas de flexión. A su vez, se realiza el radio de curvatura con una fresa espiga de acero rápido ( $\varnothing 32$ ) a 800 rpm con un avance de 40 mm/min. Para finalizar, se lija los bordes de la probeta, se mide el ancho y espesor de la sección reducida y se marca en el centro (véase **Figura 2.47**).



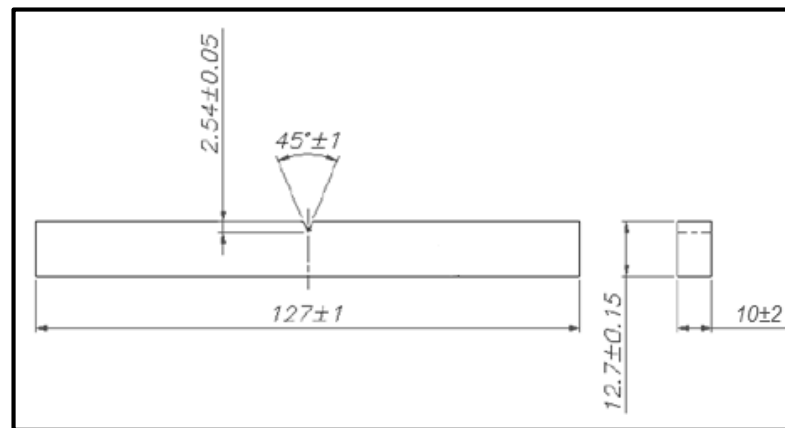
**Figura 2.46.** Dimensiones de la probeta de tracción de acuerdo a la norma ASTM D 1037 – 06a



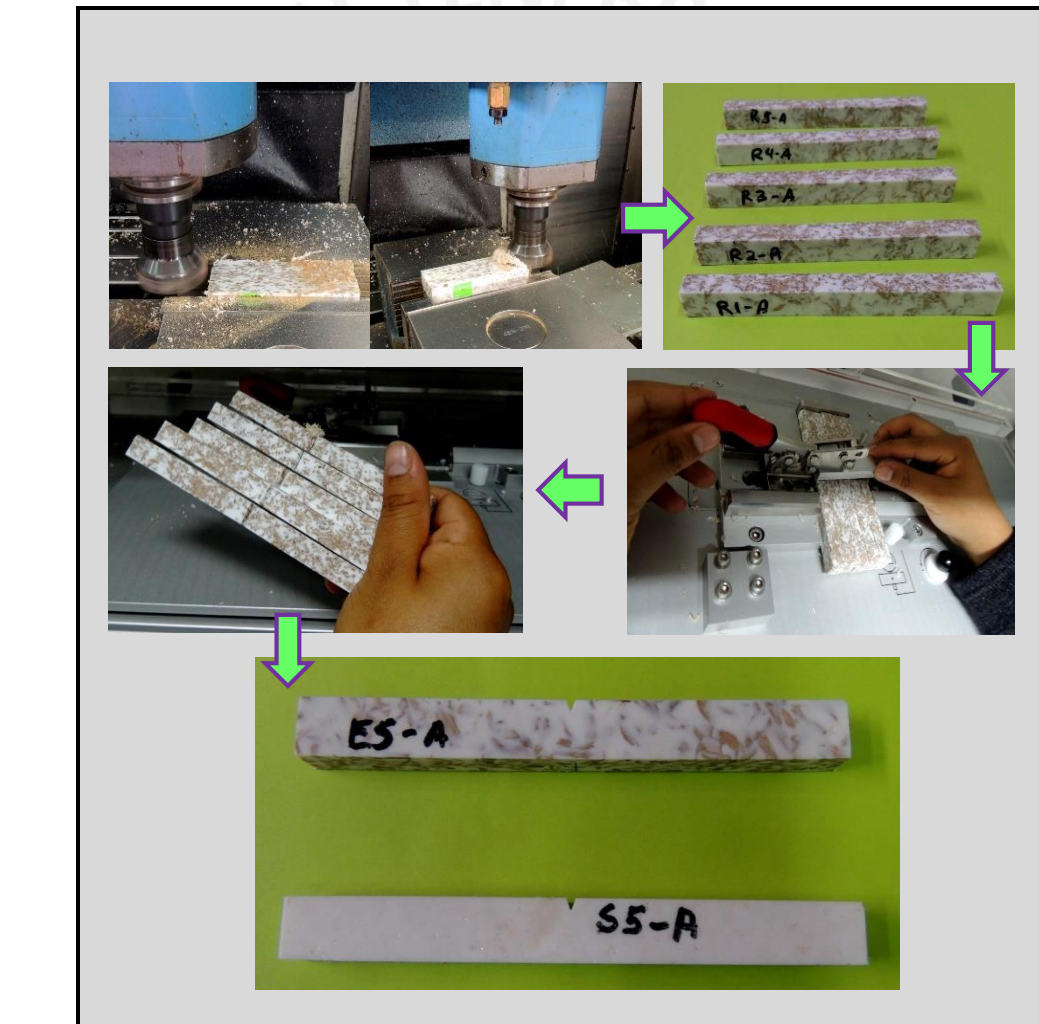
**Figura 2.47.** Proceso seguido para la fabricación de las probetas de tracción

### 2.6.5 Procedimiento de fabricación de probetas para el ensayo de impacto Charpy

Según la norma ASTM D 6110 – 05a, la probeta de impacto debe presentar las medidas mostradas en la **Figura 2.48**. Estas tolerancias pueden ser alcanzadas en el CNC; por tanto, se selecciona un grupo de 4 muestras, se posiciona en el centro de mecanizado y con el uso de la fresa con insertos ( $\varnothing 50$ ) se obtiene las dimensiones requeridas. Para el mecanizado de la entalla de la probeta, se utiliza la fresadora de entalla, la cual permite tener un ángulo de  $45 \pm 1^\circ$  y un radio de curvatura de  $0,25 \pm 0,05$  mm de 4 probetas juntas. Finalmente, se mide el espesor y el ancho en la entalla de cada una de las probetas. En la **Figura 2.49**, se señala el proceso seguido en la obtención de probetas para el ensayo de impacto Charpy.



**Figura 2.48.** Dimensiones de la probeta de impacto de acuerdo a la norma ASTM D 6110 – 05a



**Figura 2.49.** Proceso seguido durante la fabricación de las probetas de impacto

## 2.7 Realización de los ensayos mecánicos y físicos del material compuesto:

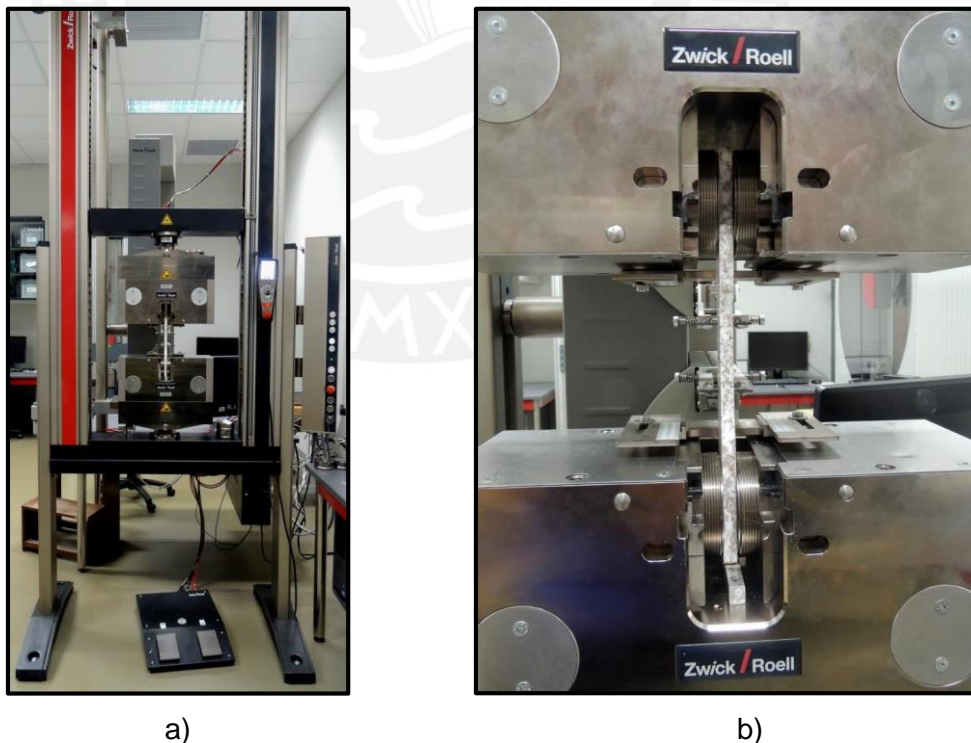
### 2.7.1 Equipos empleados:

#### a. Máquina de tracción y flexión:

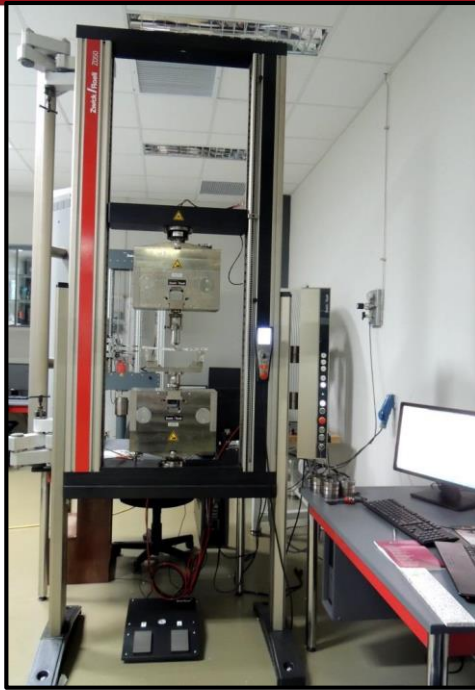
La máquina de ensayo universal Zwick/Roell Z050 posee una célula de carga de 50 kN. y permite la realización tanto del ensayo de flexión como de tracción. El primer ensayo de probetas normalizadas se realiza con la instalación de un cabezal y bloques de apoyo, y el segundo mediante unas mordazas de sujeción y un extensómetro (véase **Figura 2.50** y **2.51** respectivamente). La máquina cuenta con software testXpert de Zwick, que es fácil de usar y de diseño modular.

#### b. Máquina de Impacto:

La máquina universal de impacto Zwick/Roell HIT25P (hasta 25 Joules) posee un péndulo de alto nivel de rigidez en la dirección del impacto y una fuerte concentración de la masa en el punto de impacto, lo cual mediante la conexión al sensor permite evaluar los valores confiables de ensayo de impacto Charpy con el uso del software testXpert II (véase **Figura 2.52**).



**Figura 2.50.** a) Máquina de ensayo universal Zwick/Roell Z050, b) mordazas

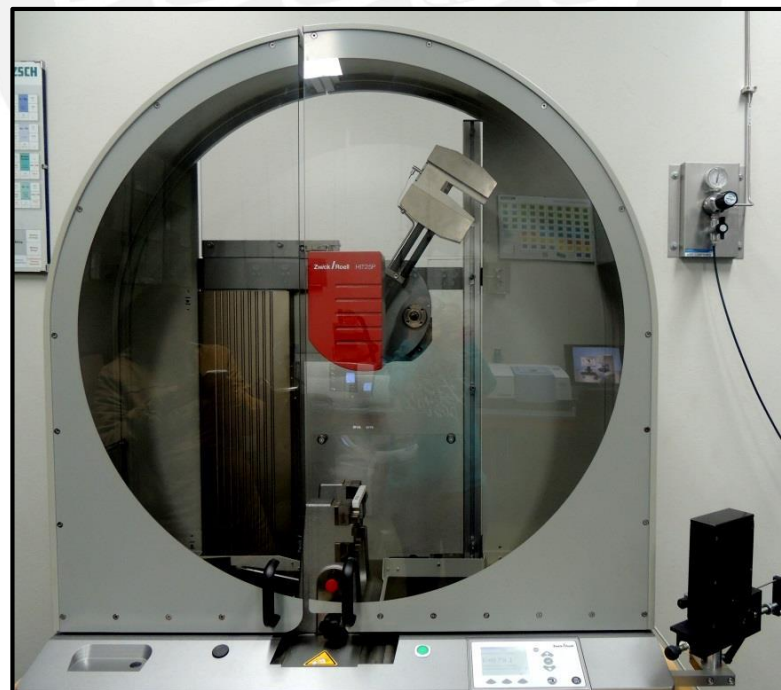


a)



b)

**Figura 2.51.** a) Máquina de ensayo universal Zwick/Roell Z050, b) cabezal y bloques de apoyo



**Figura 2.52.** Máquina de impacto Zwick/Roell HIT25P

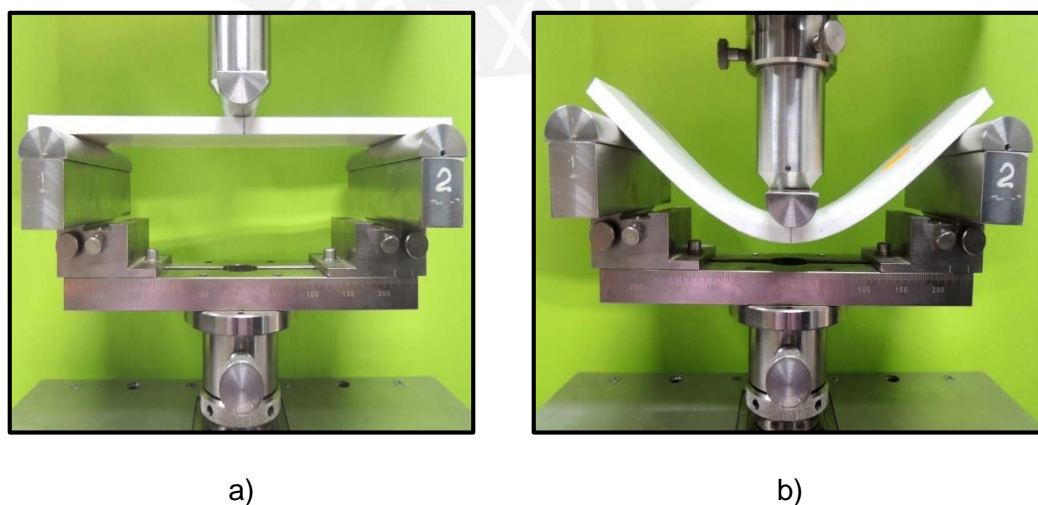
### 2.7.2 Ensayo de flexión

El ensayo de flexión del material compuesto se realiza de acuerdo a la norma ASTM D 1037 – 06a: Parte A.

El procedimiento se basa en realizar el montaje con el cabezal y bloque de apoyo en la máquina de ensayo universal Zwick/Roell Z050; seguidamente, la probeta es apoyada y centrada utilizando como guía la marca realizada en el centro de la misma (véase **Figura 2.53a** y **2.53b**). El espaciamiento entre apoyos es de 240 mm y la velocidad de ensayo es de 5 mm/min. En la **Figura 2.53b** y **2.54b** se detalla el ensayo de flexión realizado a una muestra de CPM y PPR respectivamente.



**Figura 2.53.** a) Inicio del ensayo de flexión de una probeta según la norma ASTM D 1037, b) máxima deformación del material compuesto



**Figura 2.54.** a) Inicio del ensayo de flexión de una probeta de PPR, b) máxima deformación

Para obtener la resistencia a la flexión y el módulo elástico en flexión del material se realiza el cálculo utilizando la **Ecuación 2.7** y **2.8**, cuyo valor depende de las dimensiones de la probeta antes del ensayo y el resultado del ensayo.

$$R_b = \frac{3F_{m\acute{a}x}L}{2bd^2} \quad (2.7)$$

$$E = \frac{L^3}{4bd^3} \times \frac{\Delta F}{\Delta y} \quad (2.8)$$

donde:

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

$F_{m\acute{a}x}$ : Fuerza máxima obtenida durante el ensayo (N)

L: Longitud entre apoyos (mm) = 240 mm

b: Ancho de la probeta (mm)

d: Espesor de la probeta (mm)

E: Módulo elástico en flexión (MPa)

$\Delta F$ : Diferencia entre dos puntos de la fuerza (zona lineal) en la gráfica obtenida del ensayo de flexión (N)

$\Delta y$ : Diferencia entre dos puntos del alargamiento en la gráfica del ensayo de flexión correspondientes a las fuerzas anteriores (mm)

### 2.7.3 Ensayo de tracción

Los ensayos de tracción se realizan según la norma ASTM D 1037 – 06a: Parte A.

Para el ensayo de tracción se utiliza la misma máquina del ensayo de flexión con la diferencia de que se acondiciona para el uso de las mordazas y el extensómetro. Por tanto, se sujeta la probeta de tracción con las mordazas autoalineadoras y autotensantes (**Figura 2.55a** y **2.56a**), con el fin de que la probeta no deslice y el extensómetro pueda medir el alargamiento del material durante el ensayo. La velocidad de ensayo utilizada es de 4 mm/min y la longitud calibrada desde donde parte el ensayo es igual a 50 mm. En la **Figura 2.55b** y **2.56b** se puede visualizar la rotura de la probeta concluido el ensayo.



a)

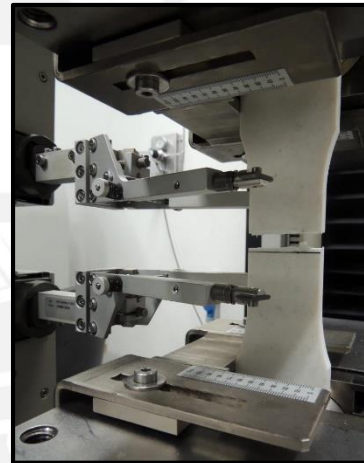


b)

**Figura 2.55.** a) Inicio del ensayo de tracción del CPM, b) rotura de la probeta



a)



b)

**Figura 2.56.** a) Inicio del ensayo de tracción del PPR, b) rotura de la probeta

Por último, se calcula el valor de la resistencia y módulo elástico en tracción empleando las **Ecuaciones 2.9 y 2.10**.

$$R_t = \frac{F_{m\acute{a}x}}{bd} \quad (2.9)$$

$$E_t = \frac{L}{bd} \chi \frac{\Delta F}{\Delta y} \quad (2.10)$$

donde:

$R_t$ : Resistencia a la tracción de la probeta (MPa)

$F_{m\acute{a}x}$ : Fuerza máxima obtenida durante el ensayo (N)

L: Longitud calibrada en la máquina de ensayo (mm) = 50mm

b: Ancho de la probeta (mm)

d: Espesor de la probeta (mm)

Et: Módulo elástico en tracción (MPa)

$\Delta F$ : Diferencia entre dos puntos de la fuerza (zona lineal) en la gráfica obtenida del ensayo de tracción (N)

$\Delta y$ : Diferencia entre dos puntos del alargamiento en la gráfica del ensayo de tracción correspondientes a las fuerzas anteriores (mm)

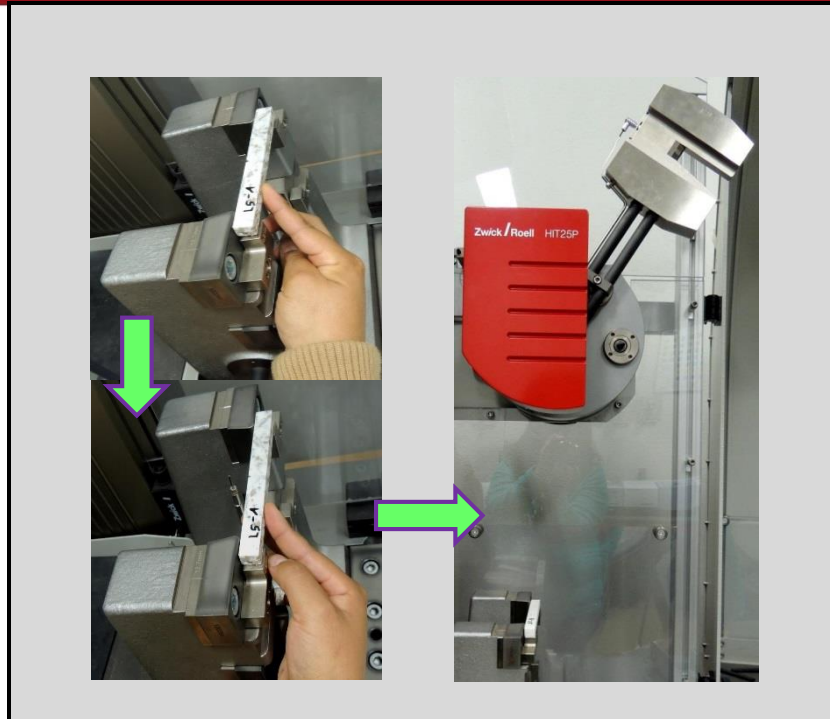
#### 2.7.4 Ensayo de impacto Charpy

El ensayo de impacto Charpy se realiza para probetas entalladas según lo indicado en la norma técnica ASTM D 6110 – 05a.

El procedimiento consiste en ubicar horizontalmente la probeta entallada en un tope de la máquina de impacto Zwick/Roell HIT25P del Laboratorio de Materiales. Seguidamente se coloca los datos de dimensiones de la probeta (espesor y ancho en la entalla) y se acciona el botón que permite que el péndulo impacte a la probeta dividiéndola en dos. Los resultados de resistencia al impacto ( $R_i$ ) son obtenidos mediante el software testXpert II conectado al sensor de la máquina. En la **Figura 2.57**, se puede visualizar un ensayo de impacto y en la **Figura 2.58** se muestran algunas probetas de impacto luego de ser ensayadas.



**Figura 2.57.** a) Probeta de impacto ensayada, b) rotura de la probeta de impacto



**Figura 2.58.** Ensayo de impacto según ASTM D 6110 – 05a

### 2.7.5 Ensayo de densidad del material compuesto

El ensayo de densidad se realizó de acuerdo a la norma ASTM D 792 – 13: Método A para ensayar materiales de 1 a 5g en agua.

En primer lugar, se procede a cortar las mitades de cada probeta de impacto ensayada con la finalidad de obtener una muestra de longitud de 50 mm (aprox. Entre 4 y 6g) cuidando la zona de rotura para su posterior análisis.

En segundo lugar, se secan las muestras a  $103 \pm 2$  °C por 24 horas; luego de ese tiempo, se retiran las muestras del horno y se colocan en un desecador. Posteriormente, se acondiciona la balanza analítica con sus respectivos accesorios para proceder a ejecutar el ensayo. Así, se determina la masa de la muestra seca en el aire (a), se sumerge la muestra junto con el lastre para evitar que este flote y se registra su masa (b), finalmente se sumerge el lastre y se anota su masa (w).

El valor de la densidad del compuesto ( $\rho_{CPM}$ ) se calcula mediante la **Ecuación 2.11** a la temperatura del agua igual a 23,4 °C.

$$\rho_{CPM} = \frac{a}{(a+w-b)} \times 0,997 \quad (2.11)$$

donde:

a=Masa aparente del espécimen, sin lastre, en el aire (g)

b=Masa aparente del espécimen y del lastre completamente sumergidos(g)

w=Masa aparente del lastre completamente sumergido (g)

En la **Figura 2.59**, se presenta el procedimiento seguido para encontrar el valor de la densidad de la madera capirona.



**Figura 2.59.** Proceso para la determinación de la densidad del material compuesto

### 2.7.6 Ensayo de absorción de agua del material compuesto

El ensayo de absorción de agua del compuesto se realiza con el seguimiento de la norma técnica ASTM D 1037 - 06a: Métodos de ensayo B.

El procedimiento seguido es el mismo que se utilizó para determinar la cantidad de absorción de agua de la capirona (ver **Apartado 2.2.4**) tal y como se puede observar en la **Figura 2.60**.

La absorción de agua en el material compuesto de plástico y madera se calcula mediante la **Ecuación 2.12**.

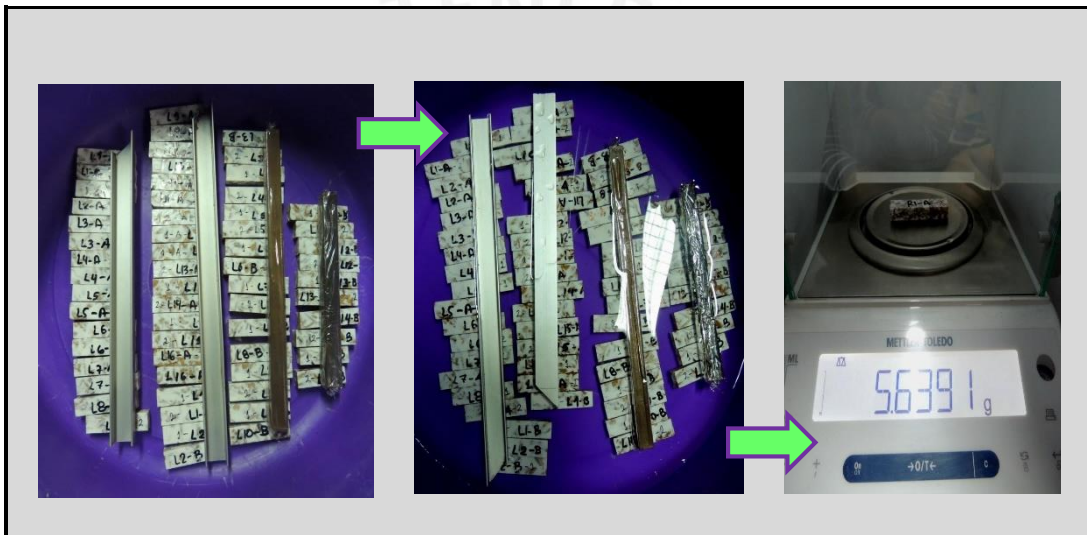
$$A_{CPM}(\%) = \frac{W_a - W_s}{W_s} \times \rho_{H_2O} \quad (2.12)$$

donde:

$A_{MC}(\%)$  = Porcentaje de absorción de agua del compuesto

$W_s$  = Peso del material compuesto seco (g)

$W_a$  = Peso del material compuesto luego de 24 h de inmersión en agua (g)



**Figura 2.60.** Proceso para determinar la cantidad de agua absorbida en el CPM durante 24 h

## 2.8 Caracterización del material compuesto

### 2.8.1 Equipos empleados

#### a. Estereoscopio óptico:

El estereoscopio óptico S6D de la marca Leica permite el análisis macrográfico del material compuesto en una capacidad desde 6,3 hasta 40 aumentos (véase **Figura 2.61**).



**Figura 2.61.** Estereoscopio óptico conectado a una PC

**b. Microscopio electrónico de barrido (SEM):**

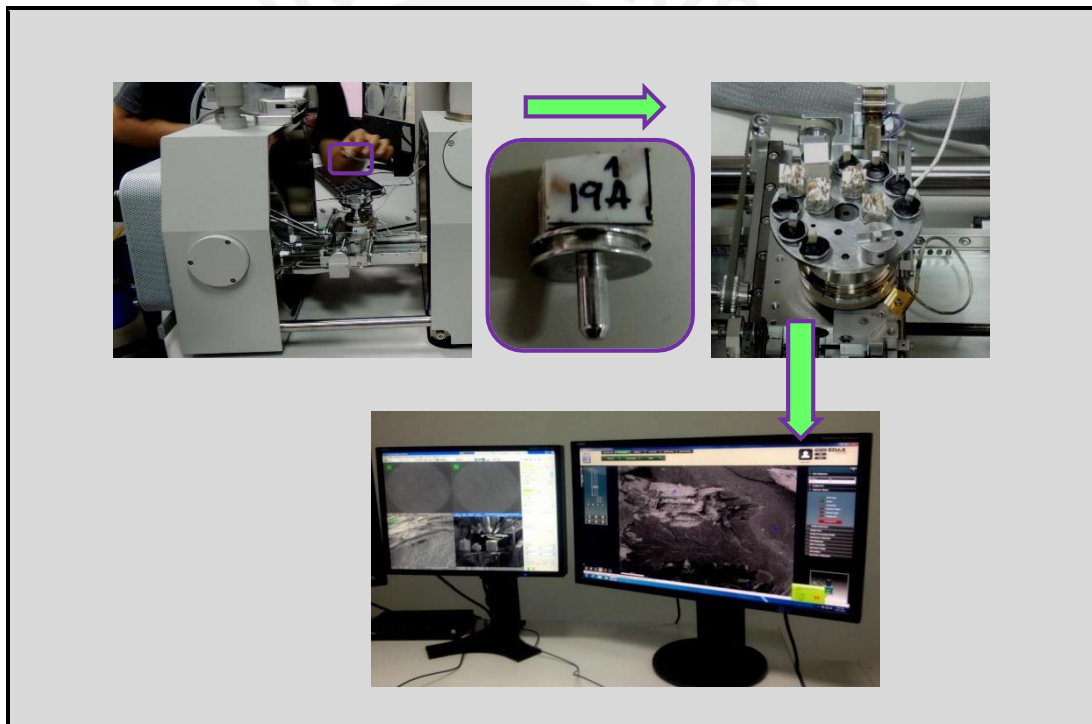
El microscopio electrónico de barrido, tal y como se muestra en la **Figura 2.62**, es una Quanta 650 y posee un voltaje de aceleración entre 200 V a 30 kV con un rango de aumentos desde 6 a 1000000x.



**Figura 2.62.** Microscopio electrónico de barrido (SEM)

### 2.8.2 Análisis morfológico del material compuesto:

Los estudios morfológicos se realizaron en partes de las probetas fracturadas de los ensayos de tracción, flexión e impacto sin preparación adicional, utilizando un microscopio electrónico de barrido (SEM) operado con un voltaje de aceleración de 15 kV y en modo bajo vacío. De esta manera, las imágenes fueron obtenidas mediante la optimización de las señales de electrones secundarios y retrodispersados con una alta resolución (aumentos de 25x, 50x y 100x). Por tanto, se consiguieron tres tipos de imágenes: con contraste composicional, topográfica y una mezcla de ambos. En la **Figura 2.63** se presenta un esquema del procedimiento seguido para el análisis de la adhesión de las partículas de madera y plástico.



**Figura 2.63.** Proceso para analizar la adhesión de las partículas de PPR-MC: acondicionamiento de las muestras a un portamuestra, se coloca un conjunto de muestras en el equipo y se procede a analizar modificando los aumentos.

## CAPÍTULO III

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presenta los resultados hallados y las tendencias respectivas de cada uno de los ensayos desarrollados en la metodología experimental. De esta manera, se indica las propiedades obtenidas a partir de la caracterización de la materia prima (MC y PP). Además de ello, se presenta los parámetros óptimos de moldeo por compresión de muestras planas de materiales compuestos obtenidos por sinterizado de polipropileno reciclado y madera capirona recuperada. Finalmente, se realiza un análisis de las propiedades mecánicas, físicas, térmicas y la morfología del material compuesto.

### 3.1 Caracterización de la madera capirona

La madera posee tres principales componentes, tales como la celulosa (40 – 50% de la madera), hemicelulosa, lignina (16 – 25% para maderas duras y de 23 – 33% para maderas blandas) y cantidades menores de otros materiales (Miller, 1999) . De éstos constituyentes químicos, la celulosa es responsable de muchas propiedades de la madera (Monteiro). El análisis químico de la capirona, realizado por Sibille (2006), indica que el valor de hemicelulosa y celulosa son de 18,6% y 59,71% respectivamente. Además de ellos, los valores de los extractivos AB (alcohol benceno) es 2,2% el cual es muy bajo comparado con otras maderas. El valor de sílice es 0,14; por tanto, no se considera una madera abrasiva.

Los valores presentados en la **Tabla 3.1** corresponden a la caracterización de la capirona que hizo Smith (2012), quien es integrante del grupo de investigación de Polímeros y Materiales Compuestos de la PUCP de la que forma parte este trabajo de tesis.

**Tabla 3.1** Resultados de la caracterización de la capirona (Smith, 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
Otros	55,64

Así, se puede observar que el valor de la lignina de la capirona es 22,41% y está dentro del rango comúnmente encontrado en maderas duras. También se puede notar que el porcentaje de celulosa en la capirona es alto (aproximadamente 55,64%).

Debido a los diversos constituyentes que posee la madera capirona, es primordial determinar sus propiedades físicas y térmicas con el propósito de analizar dichos resultados y su influencia en el comportamiento del material compuesto.

### 3.1.1 Densidad de la madera capirona ( $\rho_{MC}$ )

La densidad es una de las propiedades físicas más importantes de la madera y define la mayoría de sus características físicas y mecánicas (Coronel, 1994; Pereyra, 2002; citado en Roussy, 2013). No obstante, ésta propiedad puede variar en función de la edad y la altura del árbol, la procedencia de la madera la cual es afectada por el clima y las características del suelo (Calvo, 2007) y la silvicultura (Harris, 1991). Además de ello, debido a que la madera no es homogénea, existen variaciones dentro de una misma plantación y aún en un mismo árbol (citado en Calvo, 2007), dependiendo de su localización en el tronco. Por ejemplo, se ha encontrado que la densidad básica es mayor en la base que en las partes más altas del tronco (Baonza, 2001).

Debido a que el origen de la MC utilizada en la investigación no es conocida, se determinó la densidad de la madera; ya que, se considera una propiedad física fundamental para utilizar como dato en la fabricación del material compuesto. Por tanto, en la **Tabla 3.2** se observa los resultados de la densidad seca para 5 muestras de capirona, así se obtuvo un valor promedio de  $0,736 \pm 0,015 \text{ g/cm}^3$ . Además, en la **Tabla 3.3**, se presenta diversos valores de densidad reportados por otros investigadores; por tanto, el resultado de densidad encontrado es congruente y se utilizará para calcular la cantidad de madera necesaria para fabricar el CPM.

**Tabla 3.2** Densidad de diversas muestras de madera capirona

Muestra	$M_{Ma}$ (g)	$M_{Ms}$ (g)	$M_L$ (g)	$\rho_{MC}$ ( $\text{g/cm}^3$ )
1	3,2430	13,4216	14,5517	0,740
2	3,3925	13,4496	14,5517	0,753
3	2,4407	13,6864	14,5517	0,737
4	3,3848	13,3262	14,5068	0,740
5	2,4317	13,5602	14,5590	0,707

**Tabla 3.3** Valores de densidad de la madera capirona de diversas investigaciones

Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Referencia
0,52 <sup>[1]</sup>	Valenzuela 1977
0,56 <sup>[2]</sup>	Valenzuela 1977
0,64 <sup>[2]</sup>	IEB LTDA.
0,74 <sup>[1]</sup>	AMAZONÍA VIVA
0,75 <sup>[1]</sup>	FAO-PAFBOL
0,76 <sup>[1]</sup>	Sibille 2006, Valderrama 1993
0,76 <sup>[2]</sup>	Baluarte 2002
0,78 <sup>[1]</sup>	Vasquez 2014
0,78 <sup>[2]</sup>	ARBOCENTER
0,78 <sup>[3]</sup>	IEB LTDA.
0,87 <sup>[3]</sup>	AWP
0,9 <sup>[3]</sup>	FAO-PAFBOL

[1] Densidad básica, [2] Densidad seca, [3] Densidad al 12% de humedad

### 3.1.2 Contenido de humedad de la madera (%H<sub>Mc</sub>)

La madera es un material semiporoso (Canadian Wood Council 2004) e higroscópico; por tanto, ésta absorberá vapor de agua de la atmósfera (Monteiro). En otras palabras, su contenido de humedad depende de la humedad relativa del ambiente (%HR) enlazado a los cambios estacionales. Así, a medida que aumenta la HR, aumenta el contenido de humedad de la madera (%H<sub>M</sub>) y ésta se expande; por el contrario, cuando la HR disminuye también disminuye el %H y se encoge la madera (TIC 2010). En la **Tabla 3.4** se presenta un esquema simplificado de los valores de HR y %H<sub>M</sub>.

**Tabla 3.4** Humedad relativa vs. Contenido de humedad de la madera

Humedad relativa (%HR)	Contenido de humedad (%H <sub>M</sub> )
0	0
25	5
50	9
75	14
99	23-30

Nota. Fuente: Adaptado de TIC 2010.

En la **Tabla 3.5** se presenta los resultados de contenido de humedad hallados para cinco muestras diferentes de la madera; por lo tanto, el promedio de estos valores es  $12,77 \pm 0,23$  %.

**Tabla 3.5** Contenido de humedad de diversas muestras de madera capirona

Muestra	$W_v$ (g)	$W_i$ (g)	$W_f$ (g)	% $H_{Mc}$
1	112,2258	164,3575	157,5800	13,00
2	96,3342	147,4099	140,7504	13,04
3	91,3978	142,4378	136,0588	12,50
4	91,0660	145,1120	138,3470	12,52
5	92,3322	147,8422	140,7462	12,78

Cabe resaltar que la dispersión de los resultados podría deberse a que las muestras tomadas son de diversas partes del árbol. Puesto que la variabilidad del contenido de humedad existe incluso dentro de partes individuales cortadas de un mismo árbol (Simpson, 1999). Así, la humedad se mueve con mayor libertad en la albura (parte externa) debido a que los extractivos químicos tapan los pasadizos en el duramen (parte interna); por lo tanto, generalmente la albura seca más rápido que el duramen y existe una diferencia de humedad el cual depende de la especie (Simpson, 1999).

Se puede corroborar que el contenido de humedad encontrado en la madera capirona guarda relación con la humedad relativa de Lima en la fecha de ensayo (aproximadamente 70% en diciembre de 2015). Así, el resultado varía respecto al valor de humedad de la capirona hallado por Smith (2012), el cual es de 14,06% y, como se mencionó anteriormente, posiblemente la diferencia se debe a que la humedad relativa del ambiente no fue la misma para ambos ensayos. No obstante, otra investigación reportó que el contenido de humedad de la capirona es de 12% + 1% (Weber, 2005) con lo cual se puede aprobar el valor encontrado.

Además de ello, el % $H_M$  cambiará con el cambio en las condiciones en las que se utiliza la madera. Los productos de madera cambian de dimensiones al secarse o al absorber humedad (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2009). Este hecho puede generar resultados insatisfactorios en la aplicación de un producto de

material lignocelulósico; de esta manera, existen diversos rangos de contenido de humedad permitidos para un determinado uso.

Por ejemplo, se requiere de un contenido de humedad menor o igual a 19% para productos de paneles, tales como tableros de fibra orientada, madera contrachapada (plywood), etc; inclusive muchos códigos de construcción requieren que la madera sea secada hasta obtener dicha cantidad de humedad o menos. Por otro lado, para el uso de vigas en forma de I (I-Joists) se necesita tener una humedad en el rango de 4 - 16% (Canadian Wood Council, 2004), y, en el caso de la madera dura como la capirona, para muebles, armarios y carpintería en general debe tener un %HM entre 6,8% (Simpson, 1999).

### 3.1.3 Absorción de agua de la madera (% $A_{MC}$ )

De acuerdo a investigaciones realizadas anteriormente, la madera capirona absorbe aproximadamente 50% de agua (Gago, 2011); por lo tanto, en los ensayos realizados se puede verificar dicho valor; ya que, para cinco muestras se obtuvo un valor promedio de  $42,75 \pm 8,35$  % de absorción de agua (véase **Tabla 3.6**).

**Tabla 3.6** Contenido de absorción de agua de diversas muestras de capirona

Muestra	$W_{ms}$ (g)	$W_{ma}$ (g)	$A_{MC}$ (%)
1	2,8694	4,1551	44,81
2	3,3925	4,5555	34,28
3	2,4407	3,7948	55,48
4	1,9101	2,7948	46,32
5	3,2331	4,2957	32,87

Como se puede apreciar existe una gran diferencia de absorción de agua entre la muestra 3 (55,48%) y la muestra 5 (32,87%). Para comprender un poco más este comportamiento, es necesario conocer de qué manera está presente el agua en la madera.

El agua en la madera puede ser retenida de dos formas: como agua impregnada y como agua intersticial (agua libre). La primera es retenida dentro de las paredes celulares mediante las fuerzas de adsorción; mientras que la segunda no es

retenida por alguna fuerza y se sitúa en las cavidades celulares como el lumen (Monteiro, Khazaei 2008).

Los dos mecanismos principales por los cuales el agua se puede movilizar son: la acción capilar (líquido) y la difusión de agua impregnada (vapor). La acción capilar causa que el agua libre fluya a través de las cavidades celulares y los pequeños pasadizos que conectan las cavidades de células adyacentes (Simpson 1999). En cambio, en el fenómeno de difusión el fluido migra y se propaga a través de los capilares, vasos y paredes celulares de la madera y se produce debido a la gradiente de humedad entre la superficie y el centro; por tanto, el agua se difunde desde las zonas más concentradas hacia las menos concentradas (Khazaei, 2008). De esta manera es posible que las muestras se hayan obtenido de diversas partes del árbol (algunas del exterior y otras del interior) y; por ello, sus valores de absorción de agua difieran en un 19,5%.

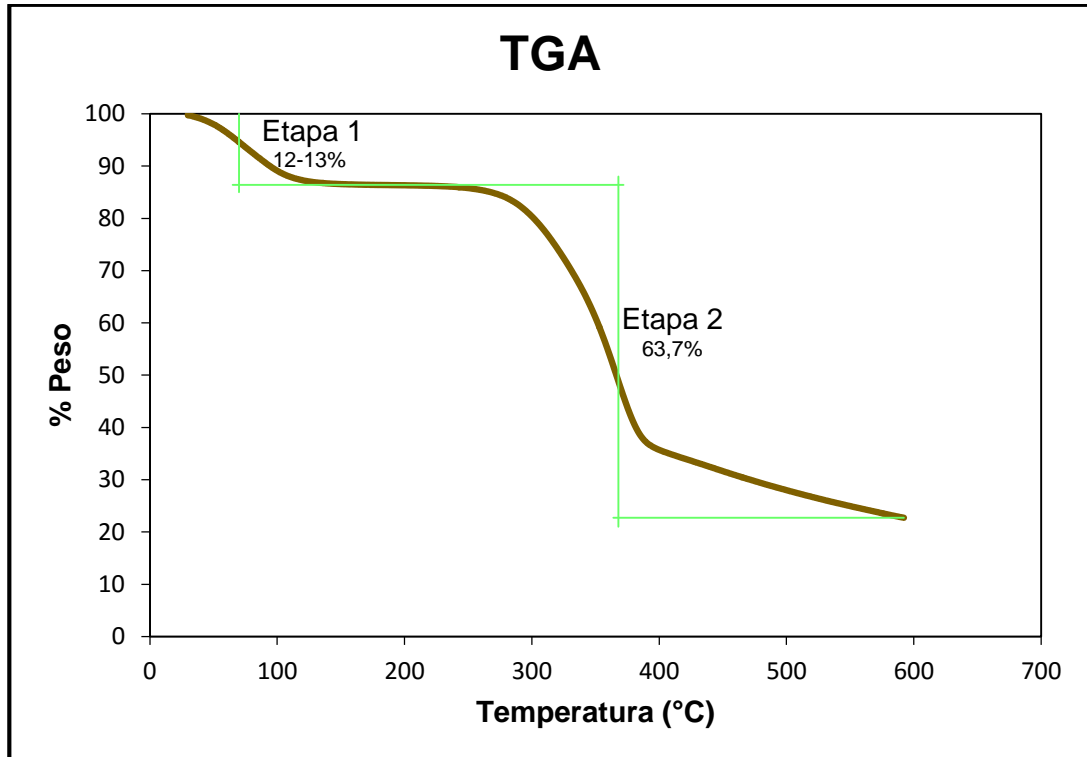
Otro motivo a ésta variación de resultados es causado por la cantidad de celulosa en la muestra; ya que, la celulosa de la pared celular de la madera contiene numerosos grupos libres hidroxilos (-OH) y éstos son responsables de la interacción con las moléculas del agua por los enlaces de hidrógeno, siendo fuertemente hidrofílicos (Ashori, 2010; Marcovich, 1998).

#### 3.1.4 Análisis termogravimétrico de la madera

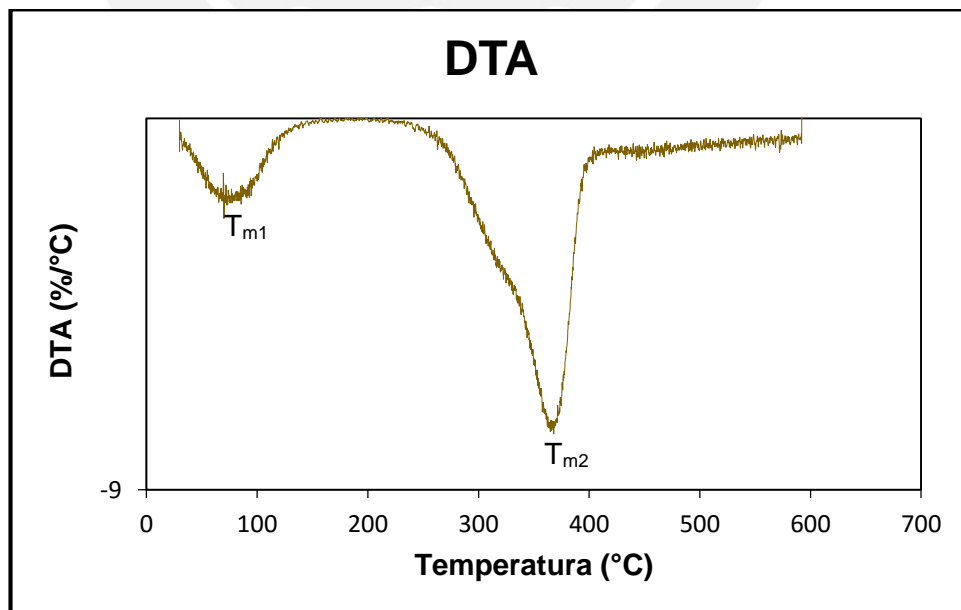
Se ha realizado el análisis termogravimétrico de la madera en una atmósfera de nitrógeno. En la **Figura 3.1** se presenta el comportamiento de la degradación térmica de la madera, la cual se da en 2 etapas. La primera etapa de degradación ocurre hasta aproximadamente los 125°C, en la cual se da una pérdida de humedad entre 12 y 13% en peso de la capirona. La segunda etapa de degradación se produce en un amplio rango de temperatura (240-600°C aproximadamente) en el cual existe una pérdida de masa de 63,7%. Consecuentemente, la exposición de la madera a elevadas temperaturas provoca cambios en su composición y así sus propiedades son modificadas (Borrega, 2008).

El reporte de una investigación presenta que la degradación térmica entre 200 y 350 °C es asignado a la degradación de la hemicelulosa y celulosa, y en el rango de 250 y 500 °C se produce la degradación de la lignina (como se cita en Jeskea, 2012).

En el termograma diferencial de la capirona (DTA) de la **Figura 3.2**, se puede apreciar los picos máximos de degradación para cada etapa 70°C y 367,98°C ( $T_{m1}$  y  $T_{m2}$  respectivamente).



**Figura 3.1.** Curva termogravimétrica de la madera capirona



**Figura 3.2.** Termograma diferencial de la madera capirona

Cabe resaltar que con la temperatura máxima de ensayo (600°C) no se obtuvo la degradación total de la madera (carbonización del material); no obstante, el porcentaje de cenizas obtenido es de 22,72% en peso a 592,23°C. Este valor forma parte de la composición inorgánica de la madera, el cual es una característica significativa de cada especie; por tanto, un análisis químico detallado del carbón realizado por Machado (1998) indicó que la capirona puede ser utilizada para la producción de insumos energéticos.

De este análisis se puede concluir que para evitar degradar a las partículas de madera capirona durante la fabricación del compuesto se trabajará con temperaturas menores a 240°C.

### 3.1.5 Resultados de la caracterización de la madera capirona

En la **Tabla 3.7** se presenta un resumen de los resultados obtenidos a partir de los ensayos mencionados anteriormente para muestras de la madera capirona.

**Tabla 3.7** Resultados de la caracterización de la madera capirona

Característica	Norma	Promedio	Desviación estándar	CV (%)
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	ASTM D2395	0,736	0,015	2,06
Contenido de humedad %(g/g)	ASTM E871	12,77	0,23	1,8
Contenido de absorción de agua %(g/g)	ASTM D 1037	42,75	8,35	19,53
Temperatura de degradación °C	ASTM E1131	367,98	-	-
% de cenizas a 592,23°C %(g/g)		22,72	-	-

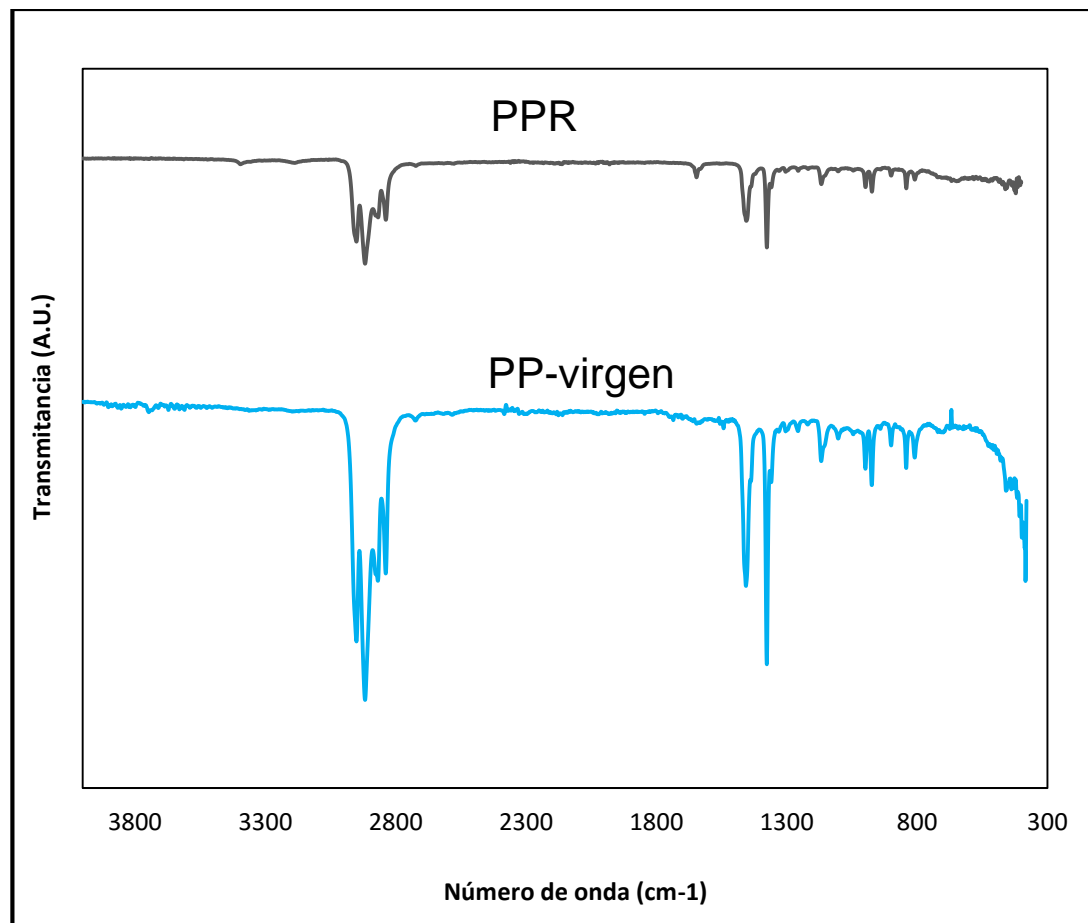
### 3.2 Caracterización del polipropileno virgen y reciclado

El homopolímero PROPILCO GRADO 02H84N (polipropileno virgen) que se suministra en forma de granza para la fabricación de las tapas, posee determinadas propiedades físicas y mecánicas, las cuales podrían variar después del proceso de conformado en la obtención de las tapas roscas de botellas. Por tanto, además de la caracterización del polipropileno reciclado (PPR) se realizó la caracterización del plástico virgen para comparar la variación de dichas propiedades y de qué manera podría influir en el comportamiento del material compuesto.

### 3.2.1 Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier

La espectroscopía FTIR-ATR fue usada para comprobar que se trata del material adecuado al comparar el espectro infrarrojo obtenido para el PPR con el PP-virgen y determinar si existe un cambio estructural del polipropileno después del proceso de conformado en la obtención de las tapas (véase **Figura 3.3**).

Los picos más característicos se registraron a longitudes de onda entre 2850-3050  $\text{cm}^{-1}$  y 1000-1700  $\text{cm}^{-1}$ , lo que indica modos de vibración de compuestos que se puedan formar en el propileno  $-(\text{CH}_2-\text{CH}(\text{CH}_3))_n-$ .



**Figura 3.3.** Espectros FTIR-ATR del PP virgen y reciclado

En la **Tabla 3.8** se presenta un resumen de las bandas más representativas del espectro infrarrojo del PP, de tal forma que se puede corroborar que se trata del mismo material.

**Tabla 3.8** Bandas características representativas del PPR y PP-virgen

Número de onda (cm <sup>-1</sup> )	Banda característica
2950, 2917, 2867 [2865] y 2838	Vibraciones C–H
1455 [1456]	Deformación asimétrica CH <sub>3</sub>
1376	Deformación simétrica CH <sub>3</sub>
1167	Vibración de los enlaces del carbono terciario
973, 841, 808 [809]	Deformación fuera del plan C–H

Nota. Fuente: Kazcmarek, 2005, valores en [x] son referidos al FTIR del PP-virgen.

### 3.2.2 Índice de fluidez (MFI)

El MFI (por sus siglas en inglés: *Melt Flow Index*) es una de las características principales de los termoplásticos; ya que, permite estudiar el comportamiento de flujo y depende inversamente del peso molecular, del número, clase y distribución de las ramificaciones del polímero. Por tanto, mediante la diferencia del MFI antes y después del proceso de conformado se puede analizar la degradación sufrida por el material durante la misma (Guajardo).

En la **Tabla 3.9** y **3.10** se puede observar los resultados de MFI promedio obtenidos para el PP-virgen (2,6 g/10 min) y PPR (2,7 g/10 min) respectivamente. De tal manera, el valor de MFI promedio para el material reciclado aumenta 3,85% con respecto al material virgen; éste resultado significa que disminuye la viscosidad del polímero. Dicho incremento del MFI es poco significativo, por lo que se puede concluir que el material reciclado sigue siendo adecuado para el moldeo por compresión como el material virgen que fue seleccionado para el mismo proceso de conformado por compresión.

Aunque la calidad del polímero reciclado disminuye luego del proceso de conformación, es posible utilizarlo en transformaciones diferentes a la que fue sometido originalmente, como ejemplo, un MFI alto es adecuado para la inyección. Esta propiedad es muy importante para seleccionar el proceso de transformación, puesto que también influye en otras propiedades como las presentadas en la **Tabla 3.11** (Guajardo).

**Tabla 3.9** Resultados del ensayo de MFI del PP-virgen

N° Ensayo	Masa de fibra extruida (g)	Tiempo de extrusión (s)	MFI (g/10 min)	MFI <sub>PROM</sub> (g/10 min)
1	0,2973		2,548	
2	0,3003		2,574	
3	0,3091	70	2,649	2,6
4	0,304		2,606	
5	0,2985		2,559	

**Tabla 3.10** Resultados del ensayo de MFI del PPR

N°. Ensayo	Masa de fibra extruida (g)	Tiempo de extrusión (s)	MFI (g/10 min)	MFI <sub>PROM</sub> (g/10 min)
1	0.3014		2.583	
2	0.3093		2.651	
3	0.319	70	2.734	2.7
4	0.3332		2.856	
5	0.3259		2.793	

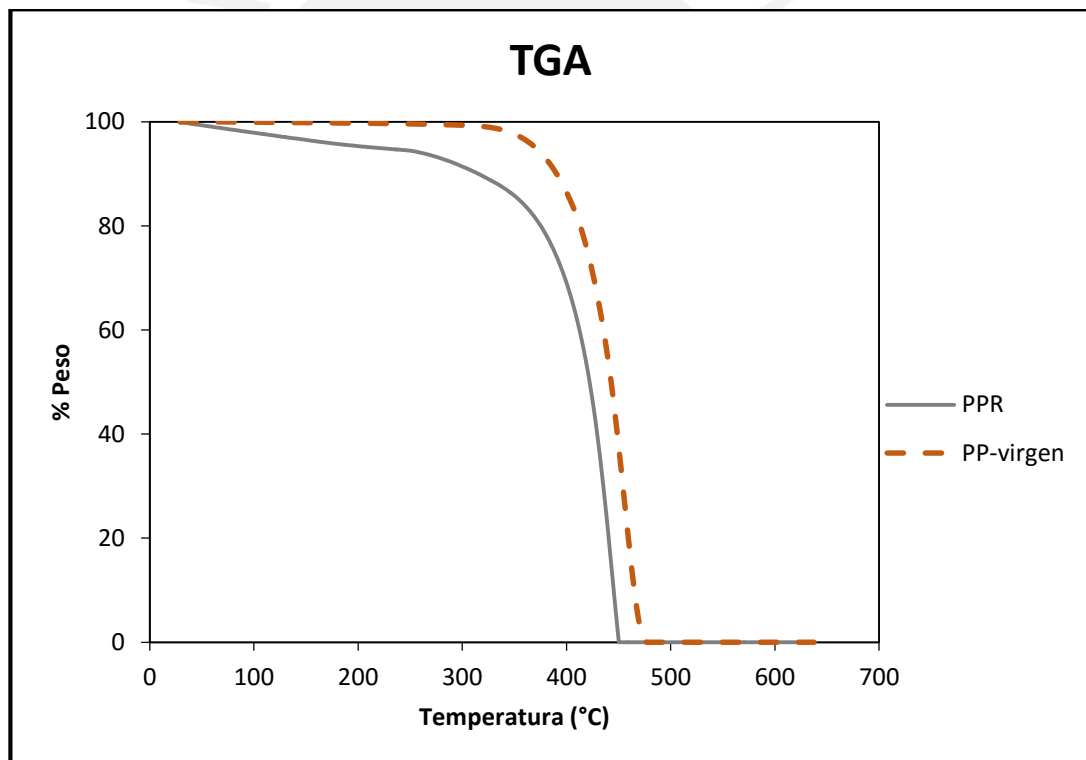
**Tabla 3.11** La influencia del MFI en otras propiedades

Propiedad	Aumento del MFI
Módulo elástico	disminuye
Elongación a la rotura	disminuye
Temperatura de fusión	casi no cambia
Temperatura máxima de uso	disminuye poco
Resistencia al impacto	disminuye mucho
Viscosidad	disminuye

**Nota.** Fuente: Adaptado de Guajardo.

### 3.2.3 Análisis térmico del plástico

El análisis termogravimétrico del plástico ha sido desarrollado en una atmósfera de nitrógeno. La muestra se degrada en una sola etapa, dicho comportamiento se puede observar en la **Figura 3.4** mediante las curvas que representan el porcentaje de pérdida de masa en función de la temperatura. En la **Figura 3.5**, se puede observar con más claridad los intervalos de degradación para el termoplástico; así, para el PP-virgen la etapa de degradación se presenta en el rango de 325 - 477 °C, mientras que para el PPR ocurre en el rango de 250 - 450 °C. De este resultado se puede notar que el PPR se degrada más rápidamente con un pico de descomposición ( $T_m$ ) igual a 444,91 °C (véase **Tabla 3.12**). La diferencia entre ambos polipropilenos es debido a que el PPR se ha degradado durante el proceso de conformado antes de ser reciclado. A su vez, del análisis se puede verificar que el PP se evapora totalmente (0% de cenizas).



**Figura 3.4.** Curva termogravimétrica del PPR y PP-virgen

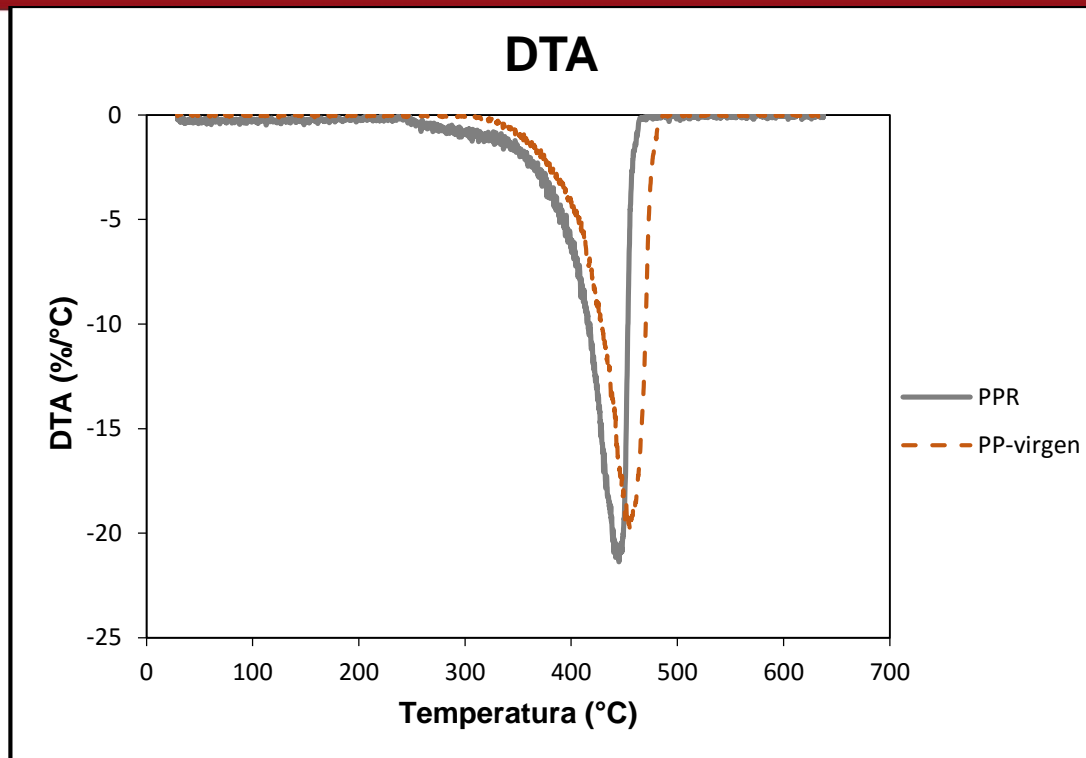


Figura 3.5. Termograma diferencial del PPR y PP-virgen

Tabla 3.12 Resumen del análisis TGA

Muestra	Rango (°C)	T <sub>m1</sub> (°C)	%Cenizas
PPR	250 - 450	444,91	0
PP-virgen	325 - 477	455,14	0

El ensayo de calorimetría de barrido diferencial se realizó con dos etapas de calentamiento y una de enfriamiento para el polipropileno, tanto virgen como reciclado (PPR). La primera etapa de calentamiento se realiza con la finalidad de eliminar impurezas y tensiones de la muestra. Por tanto, a partir del segundo calentamiento, se determina el pico de la temperatura de fusión ( $T_f$ ), la variación de la entalpía de fusión ( $\Delta h_f$ ) y la cristalinidad ( $X_c$ ), la última ha sido calculada con la **Ecuación 3.1**. En cambio, la temperatura de cristalización ( $T_c$ ) ha sido obtenida del primer enfriamiento.

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

donde:

$\Delta h_f$  = Calor de fusión

$\Delta h_f^\circ$  = Calor de fusión de un polipropileno completamente cristalino = 209 J/g (Butylina, 2011)

En la **Tabla 3.13** se presenta un resumen de los datos encontrados del análisis de las curvas DSC para el PP-virgen y PPR, tales como las temperaturas de transición ( $T_x$ ) y las variaciones de entalpía ( $\Delta h_x$ ). Por tanto, se puede notar que el proceso de cristalización de las cadenas poliméricas del PPR se da a una  $T_c$  igual a 119,8°C (debajo de su punto de fusión), la cristalización es un proceso exotérmico (libera energía) y el  $T_c$  se presenta en el termograma mediante un pico (véase **Figura 3.6**).

Durante el ensayo se ha enfriado hasta temperaturas bajas (-50°C) para conocer la  $T_g$  del PP, debido a que en el Perú existen lugares (Puno o Arequipa) en los cuales la temperatura ambiente alcanza temperaturas negativas en invierno, como por ejemplo se ha llegado a temperaturas mínimas entre 15 y 23 grados bajo cero (Reporte el Comercio). Por tanto, se ha encontrado que la  $T_g$  del PPR que se utilizará en la fabricación del CPM es de -22,4°C, valor que es menor en 13,7% con respecto a la  $T_g$  del PP-virgen. Este valor significa que a -22,4°C el material se hace más blando, razón por la cual la aplicación del CPM se limita a lugares con climas en los que se alcancen esas temperaturas.

El proceso de fusión de un polímero semicristalino, como el PP, es observado en un amplio intervalo de temperaturas (citado en Greco 2003). Como se puede observar en la **Figura 3.7**, el PPR tiene un rango igual a 95,4 – 201,6 °C, dichos valores son importantes; ya que, se pretende evaluar el sinterizado del material compuesto en este intervalo; no obstante, el  $T_f$  para el PPR es 167,5 °C.

Por tanto, los resultados obtenidos durante los calentamientos y enfriamiento del polímero virgen y reciclado muestran un comportamiento similar; no obstante, los valores cambian y esto se debe a la degradación del PPR sufrido luego del proceso de conformado recibido para la fabricación de las tapas. De esta manera, se demuestra que el PP-virgen es más cristalino que el PPR con un  $X_c$  igual a 54,07%. Ésta disminución de cristalinidad para el PPR (17,2% respecto al virgen) repercutirá en sus propiedades, algunas de ellas, se evaluarán posteriormente; no obstante, este valor pierde importancia al recordar que se trata de un material reciclado y que puede ser utilizado para otras aplicaciones que no requieran de las características de un PP-virgen.

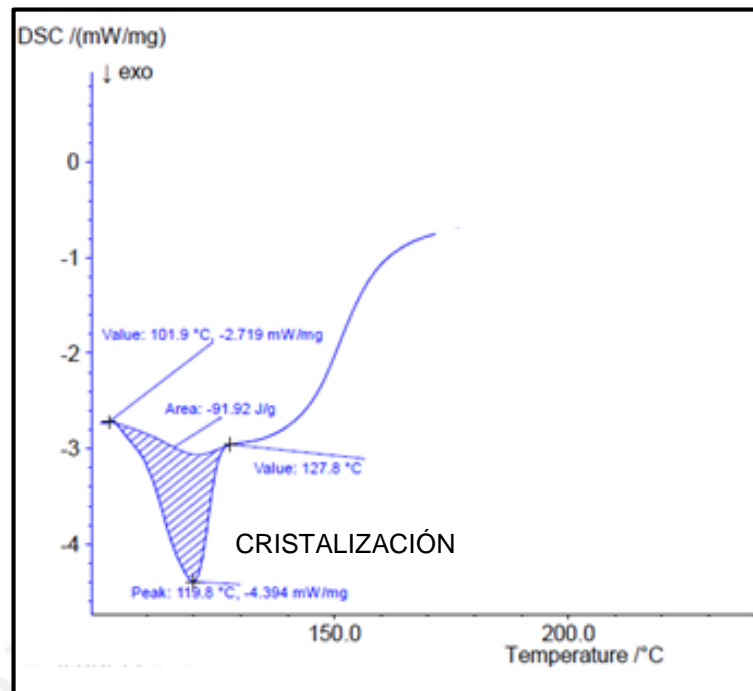


Figura 3.6. Diagrama DSC del PPR-enfriamiento

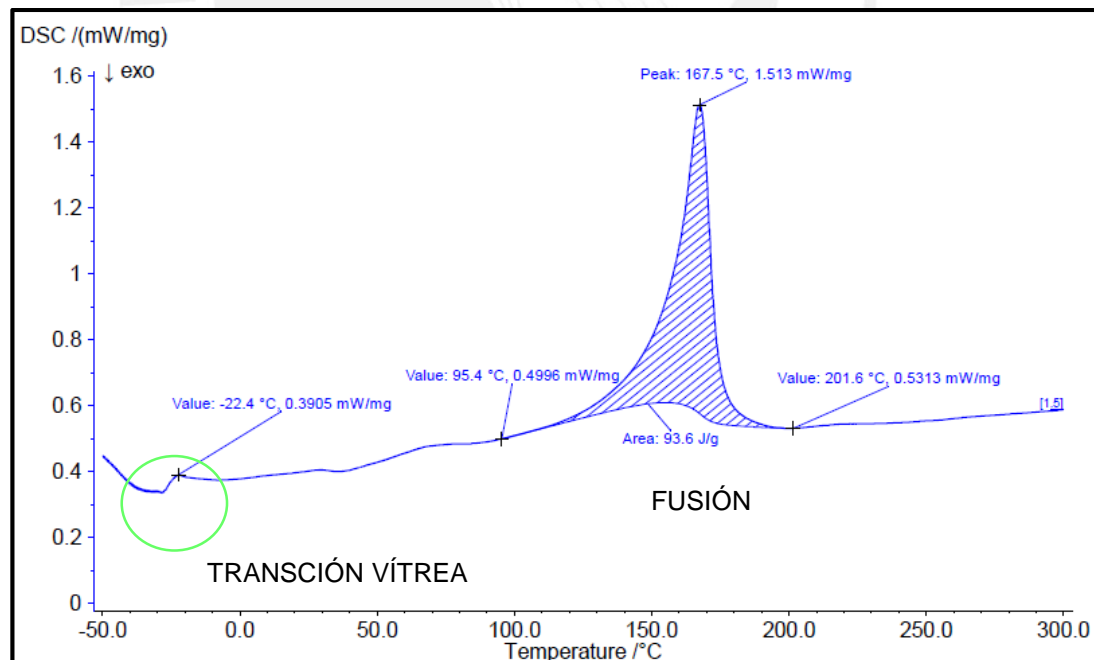


Figura 3.7. Diagrama DSC del PPR-segundo calentamiento

Tabla 3.13 Resumen del análisis de DSC

Tratamiento	Transición	Parámetros	PP-virgen	PPR
		Rango (°C)	116,6 – 204,1	115,7 – 209,9
1° calentamiento	Fusión	$T_f$ (°C)	170,8	177,7
		$\Delta h_f$ (J/g)	100,5	104,8
Enfriamiento	Cristalización	$T_c$ (°C)	124	119,8
		$\Delta h_c$ (J/g)	89,97	91,92
	Vítrea	$T_g$ (°C)	-19,7	-22,4
2° calentamiento	Fusión	Rango (°C)	108,2 – 207,7	95,4 – 201,6
		$T_f$ (°C)	168,3	167,5
		$\Delta h_f$ (J/g)	113,0	93,6
		$X_c$ (%)	54,07	44,78

### 3.3 Determinación de los parámetros de trabajo involucrados en la fabricación del material compuesto sinterizado de polipropileno y partículas de madera capirona

El proceso de fabricación de materiales compuestos a partir de PPR y MC mediante el moldeo por compresión involucra diversas variables, las cuales se reúnen en la **Tabla 3.14** y cuyos valores son necesarios conocer para encontrar los parámetros de trabajo para fabricar muestras planas sinterizadas. Por tanto, de acuerdo a la metodología experimental para la “*Parte Experimental I*”, se mantiene constante las siguientes variables: cantidad de PPR, cantidad y tamaño de partícula de MC, presión máxima aplicada, tiempo de prensado y tiempo de enfriamiento.

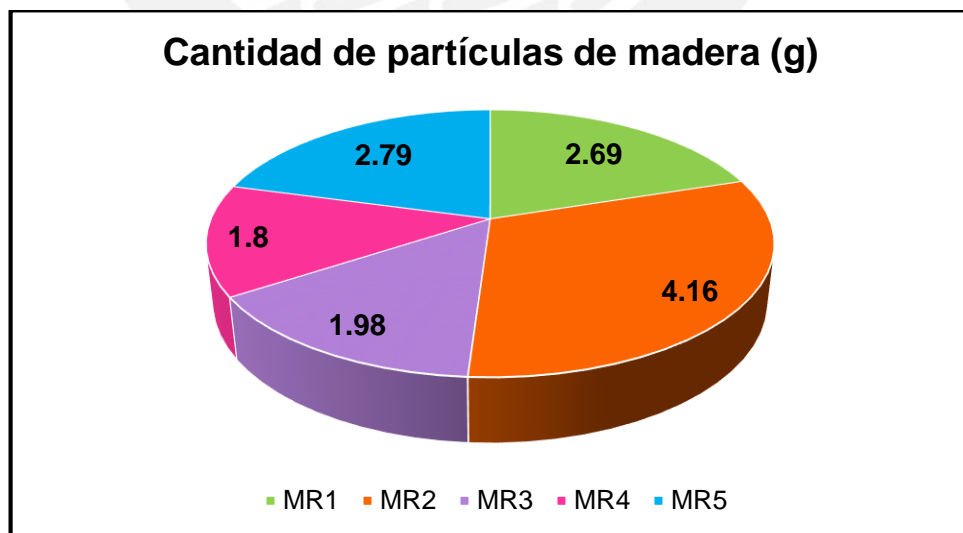
**Tabla 3.14** Variables involucradas en el proceso de fabricación del CPM

Variables	Denotación	Unidad
Tamaño de partícula de MC	MR <sub>x</sub> *	mm
Cantidad de partículas de MC	MC	%
Cantidad de PPR	PPR	%
Temperatura de trabajo medido en el molde	T <sub>w</sub>	°C
Tiempo de permanencia de la muestra a la T <sub>w</sub>	t <sub>w</sub>	min
Presión máxima aplicada	P	bar
Tiempo de prensado	t <sub>pr</sub>	min
Tiempo de enfriamiento	t <sub>e</sub>	min

\*varía de acuerdo al número de malla de los tamices como se observa en la **Tabla 2.3**

#### a. Tamaño y cantidad de partículas de madera

Se realizó un breve análisis del tamaño de partícula de MC a emplear. Para ello, se procedió a tamizar un costal de residuos de madera con un total de 13,42g de partículas, obteniéndose los resultados presentados en la **Figura 3.8**. Debido a que la cantidad de partículas de MR2 obtenidas es mayor en 31,22% con respecto al total, se optó por utilizar dicho tamaño ( $\leq 3,33$  mm).



**Figura 3.8.** Cantidad de partículas obtenidas en un costal: MR1 $\leq$ 5,15 mm; MR2 $\leq$  3,33 mm, MR3 $\leq$  1,9 mm; MR4 $\leq$  0,98 y MR5 $\leq$  0,48 mm.

Con respecto al porcentaje de materia prima a utilizar, se considera la cantidad de materia prima que el laboratorio de investigación tiene a su alcance y las facilidades encontradas en las prácticas previas de moldeo, esto último se refiere que a mayor cantidad de madera es más difícil obtener una mezcla homogénea y dificulta el proceso. Por todo lo mencionado, se ha considerado una cantidad de PPR y MC en volumen de 70% y 30% respectivamente.

#### b. Presión ejercida, tiempo de prensado y enfriamiento

Algunas variables como la presión están reguladas por el sistema de moldeo, así la prensa empleará 70 bar, cuyo valor se mantendrá constante durante la fabricación de los CPM (véase **Tabla 3.15**). En cuanto al tiempo de prensado y enfriamiento, se ha considerado de 10 min como óptimo por prácticas anteriores de moldeo; además, cabe resaltar que el enfriamiento será realizado por convección natural durante el prensado.

Es importante recalcar que la presión ejercida durante el proceso de moldeo permite que las partículas de PPR tengan la facilidad de embeber (bañar) a las partículas de capirona, constatándose que la presión es necesaria para obtener sólidos compactos (en contraste, véanse en la **Figura 3.9 a y b** el resultado de CPMs moldeados sin presión). De acuerdo a diversos estudios, indican que mediante el moldeo por compresión se puede obtener propiedades mecánicas deseables en comparación con el moldeo por inyección y extrusión, debido a que se espera que los materiales compuestos tengan buena densidad con poco o nada de espacios en su estructura (citado en Olakanmi, 2016). No obstante, se debe saber que el comportamiento mecánico no solo depende del procesamiento sino también de las condiciones del proceso. Así, se espera obtener un producto homogéneo y con el proceso de sinterizado completo en todas sus etapas.

**Tabla 3.15** Parámetros constantes del proceso de fabricación de CPM (*Parte I*)

Variables	Valor
Tamaño de partícula de MC	MR2
Cantidad de partículas de MC	30%
Cantidad de PPR	70%
Presión máxima aplicada	70 bar
Tiempo de prensado y enfriamiento	10

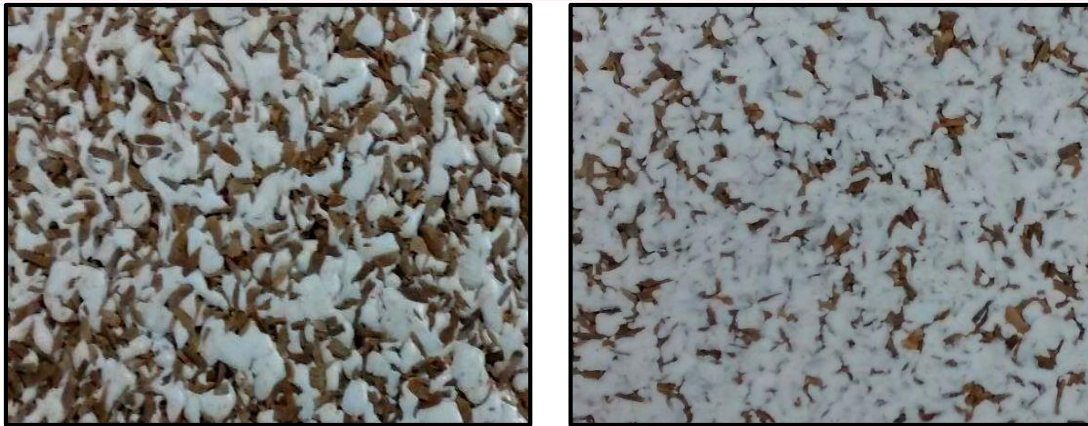
### c. Temperatura y tiempo de trabajo

Para encontrar los parámetros del proceso de sinterizado (temperatura y tiempo) de muestras planas rectangulares del material compuesto, se comenzará la investigación con temperaturas que se encuentran en el rango de fusión del PPR analizado anteriormente (desde el pico de la fusión: 167,5 °C hasta el fin de la fusión: 201,6 °C, véase **Tabla 3.13**), cuyo intervalo de temperaturas no coincide con la degradación de la capirona.

El diseño experimental inicial, propuesto en la metodología, ha sido replanteado para un mejor análisis del sinterizado, fabricándose un total de 63 muestras (en vez de 45), tal y como se observa en la **Tabla 3.16**. De esta manera las temperaturas de trabajo ( $T_w$ ) son: 170, 175, 180 y 190 °C y los tiempos de trabajo ( $t_w$ ) varían desde 10 a 100 min, considerando 3 repeticiones para cada binomio ( $T_w$ ,  $t_w$ ).

**Tabla 3.16** Cantidad de muestras obtenidas del material compuesto (*Parte I*)

$T_w$ \ $t_w$	170 °C	175 °C	180 °C	190 °C
10 min	-	-	-	3
15 min	-	-	-	3
20 min	-	-	-	3
30 min	-	-	3	3
40 min	-	-	3	3
50 min	-	-	3	3
60 min	3	-	3	3
70 min	3	3	3	3
80 min	3	3	-	-
90 min	3	3	-	-
100 min	3	-	-	-



a)

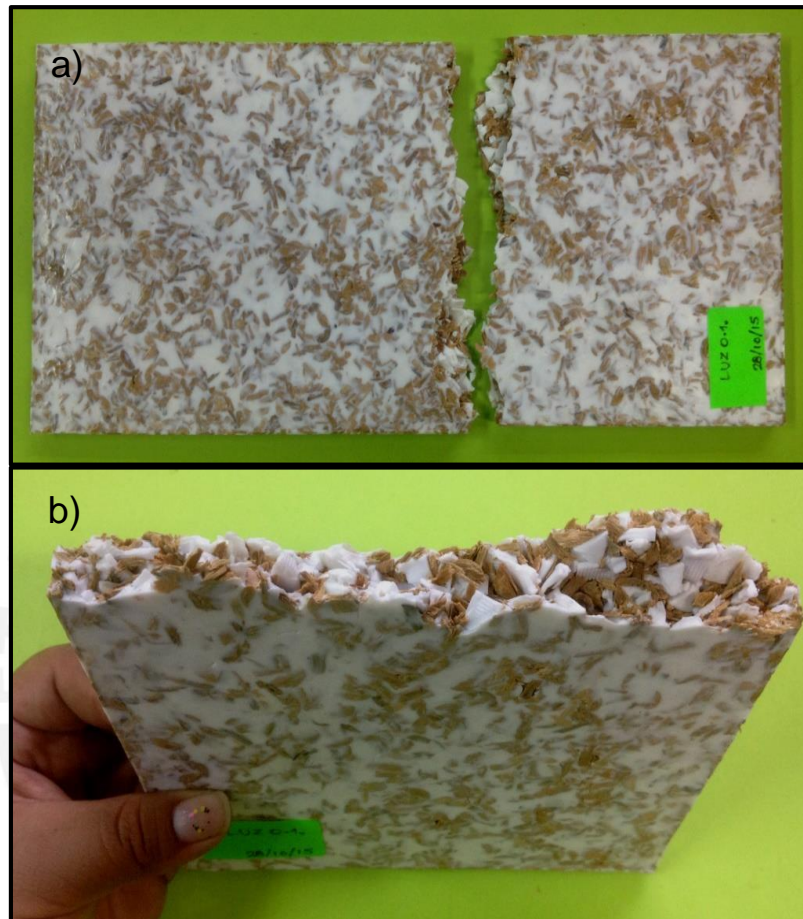
b)

**Figura 3.9.** Muestras del CPM a) Sin presión ejercida b) con poca presión ejercida

#### d. Sinterizado del material compuesto

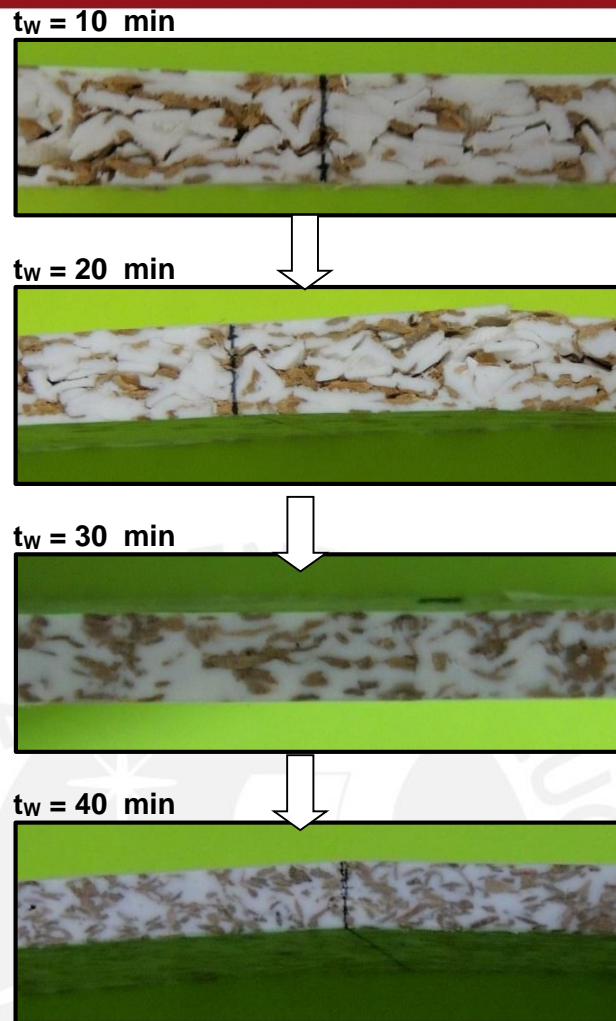
La práctica de moldeo se comenzó con la temperatura de calentamiento más alta ( $T_w=190\text{ }^\circ\text{C}$ ). Para dicha temperatura se obtuvo muestras del compuesto a partir de  $t_w=10\text{ min}$ . Aunque con los parámetros de moldeo iniciales ( $T_w=190\text{ }^\circ\text{C}$  y  $t_w=10\text{ min}$ ) la superficie mostraba solidez, al ejercer fuerza y romper la muestra se observó que internamente las partículas de PPR y MC no presentaban ninguna adhesión; no obstante, se consideró evaluar las propiedades mecánicas a partir de estos parámetros para conocer el proceso de sinterizado (véase **Figura 3.10**). Así, se puede explicar lo estudiado en el proceso de sinterizado por Beltran (2012) donde el termoplástico ha comenzado a adherirse a la superficie del molde y ha absorbido calor para entrar en contacto con otras partículas y, en este caso, ha comenzado a unirse a la capirona; por lo que, se presenta adherencia entre el PPR-MC en las paredes externas de las muestras (lados en contacto con el molde) mas no en el centro. Al incrementar el tiempo de trabajo ( $t_w$ ) se va observando un mejor proceso de sinterizado entre las partículas que conforman la muestra. En otras palabras, para la muestra plana, la etapa de crecimiento de cuellos se realiza desde las paredes del molde hacia el centro, por lo que se requiere de un determinado tiempo para que todas las partículas de plástico puedan coalescer con las partículas de madera. Cuando la temperatura aumenta a una velocidad mayor, se comienza a consolidar la muestra (etapa de densificación). Finalmente, la etapa de sinterizado concluye con el cierre de los espacios vacíos o poros, en esta última etapa la presión ejercida durante el proceso de compresión influye de manera positiva al ayudar a cerrar todos los poros formados anteriormente; sin embargo, existen poros

residuales producidos por gases atrapados. En la **Figura 3.11**, se puede observar cómo se va desarrollando el proceso de sinterizado con el tiempo a una temperatura de trabajo de 190°C.



**Figura 3.10.** Muestras del CPM a  $T_w=190\text{ }^\circ\text{C}$  y  $t_w=10\text{ min}$  a) superficialmente hay sinterizado b) internamente se observa que el proceso de sinterizado no ha concluido

Como es lógico al disminuir la temperatura de trabajo el tiempo aumentará; por lo que en el caso de  $T_w$  es 180 °C y a  $t_w$  menores o iguales a 20 minutos se obtiene una muestra poco consistente, la cual se desmorona con facilidad (véase **Figura 3.12**). De forma similar, cuando la  $T_w$  igual a 170 °C se ha encontrado que a  $t_w$  menores a 60 minutos no se obtienen muestras sólidas del material compuesto, tal y como se puede observar en la **Figura 3.13**; es decir, no existe ninguna unión entre una partícula de plástico y madera, solo se aprecia que la presión ejercida en la fabricación ha permitido mantener junta cierta parte de la muestra, aunque este compactado es muy débil.



**Figura 3.11.** Esquema del proceso de sinterizado: se puede observar en la sección transversal que en la parte superior e inferior ha empezado el proceso de sinterizado incluso a  $t_w=10$  min pero las partículas de PPR y MC continúan intactas en el centro. Por lo tanto, el proceso de sinterizado culmina en 40 min.



**Figura 3.12.** Muestras del CPM a)  $T_w=170$  °C y  $t_w=50$  min b) partículas intactas



a)

b)

**Figura 3.13.** Muestras del CPM con  $T_W=180$  °C y  $t_W=20$  min a) el proceso de sinterizado no ha terminado b) internamente las partículas están sólidas

Para seleccionar los parámetros del proceso de sinterizado, se ha realizado el ensayo de flexión a las 63 muestras del CPM obtenidas a diferentes temperaturas y tiempos de trabajo. En la **Figura 3.14** y **3.15**, se visualiza las tendencias obtenidas en la resistencia a la flexión ( $R_b$ ) y módulo elástico en flexión (E) a partir del ensayo mecánico realizado a los CPM.

A su vez, desde la **Tabla 3.17** hasta la **Tabla 3.20**, se puede apreciar los valores calculados de  $R_b$  y E promedios obtenidos de las diferentes muestras fabricadas con los parámetros descritos anteriormente (véase **Tabla 3.15**) y cómo la variación de la  $T_W$  y  $t_W$  produce ciertos efectos en los resultados.

**Tabla 3.17** Resistencia y módulo en flexión del CPM (70%PP-30%MR2) a 190 °C

Tiempo (min)	$R_{bPROM}$ (MPa)	$\sigma R_b$ (MPa)	$E_{PROM}$ (MPa)	$\sigma E$ (MPa)
10	11,87	1,57	1335,10	98,31
15	12,78	2,75	1536,09	97,98
20	20,39	2,16	1770,45	90,12
30	29,24	1,41	1920,29	68,60
40	33,65	0,81	2040,76	85,75
50	34,89	1,12	2085,68	104,72
60	30,83	1,74	1820,58	74,6
70	30,62	1,35	1782,49	64,37

**Tabla 3.18** Resistencia y módulo en flexión del CPM (70%PP-30%MR2) a 180 °C

Tiempo (min)	$R_{bPROM}$ (MPa)	$\sigma R_b$ (MPa)	$E_{PROM}$ (MPa)	$\sigma E$ (MPa)
30	11,16	0,91	1465,17	40,17
40	19,18	4,09	1637,18	187,80
50	29,44	1,14	1928,15	44,53
60	30,21	1,97	1853,93	107,76
70	31,46	1,94	1842,88	72,93

**Tabla 3.19** Resistencia y módulo en flexión del CPM (70%PP-30%MR2) a 175 °C

Tiempo (min)	$R_{bPROM}$ (MPa)	$\sigma R_b$ (MPa)	$E_{PROM}$ (MPa)	$\sigma E$ (MPa)
70	12,55	1,18	1561,51	116,34
80	16,07	1,17	1693,64	46,75
90	24,73	2,85	1849,46	67,77

**Tabla 3.20** Resistencia y módulo en flexión del CPM (70%PP-30%MR2) a 170 °C

Tiempo (min)	$R_{bPROM}$ (MPa)	$\sigma R_b$ (MPa)	$E_{PROM}$ (MPa)	$\sigma E$ (MPa)
60	2,39	0,28	663,90	80,01
70	3,62	0,73	945,59	75,75
80	4,44	1,12	997,18	83,23
90	7,46	0,70	1209,75	59,86
100	8,28	2,19	1322,20	114,49

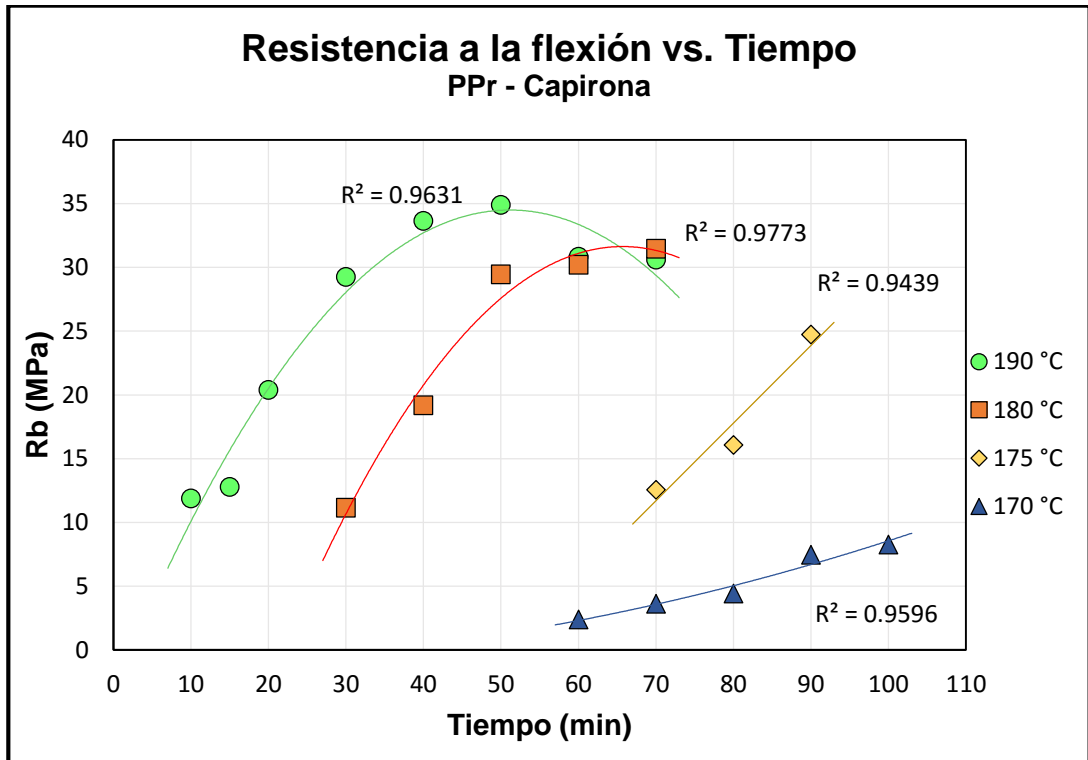


Figura 3.14. Resistencia a la flexión en función del  $t_w$  del CPM

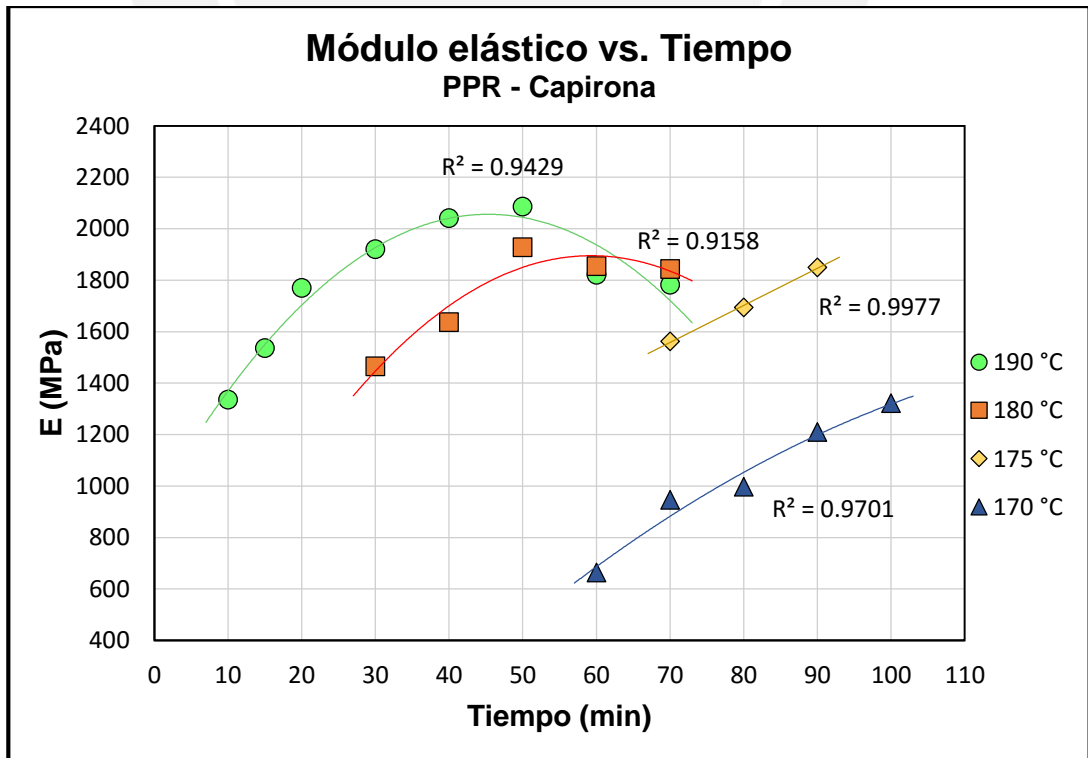


Figura 3.15. Módulo elástico en flexión en función del  $t_w$  del CPM

De los valores mostrados en las tablas anteriores, se puede notar que, para una misma  $T_w$ , conforme se aumenta el tiempo de permanencia de la muestra a la  $t_w$  se incrementan las propiedades mecánicas ( $R_b$  y  $E$ ). Sin embargo, en el caso de la  $T_w$  igual a 190 °C dicho aumento se produce hasta un valor máximo de  $R_b$  ( $34,89 \pm 1,12$  MPa) y  $E$  ( $2085,68 \pm 104,72$  MPa) en el tiempo de 50 min, por lo que a partir de un  $t_w$  igual a 60 min la resistencia y módulo en flexión disminuyen. De igual manera, para la temperatura de trabajo de 180 °C se presenta un comportamiento similar; ya que, se obtiene un valor máximo de  $E$  ( $1853,93 \pm 107,76$  MPa) en un tiempo de 60 min.

En otro sentido, al mantener un  $t_w$  constante se observan mejores propiedades mecánicas a una  $T_w$  de 190 °C; por ejemplo, en el caso de 40 min, a 190°C y 180 °C, el compuesto presenta una resistencia de 33,65 MPa y un módulo elástico de 2040,76 MPa para el ensayo de flexión; mientras que a 180°C los valores son 19,18 MPa y 1637,18 MPa respectivamente. Cabe resaltar que no se ha fabricado muestras a un tiempo de 40 min y a una temperatura de 170 °C; aun así, a 60 min la  $R_b$  y  $E$  poseen valores bajos de 2,39 y 663,90 respectivamente.

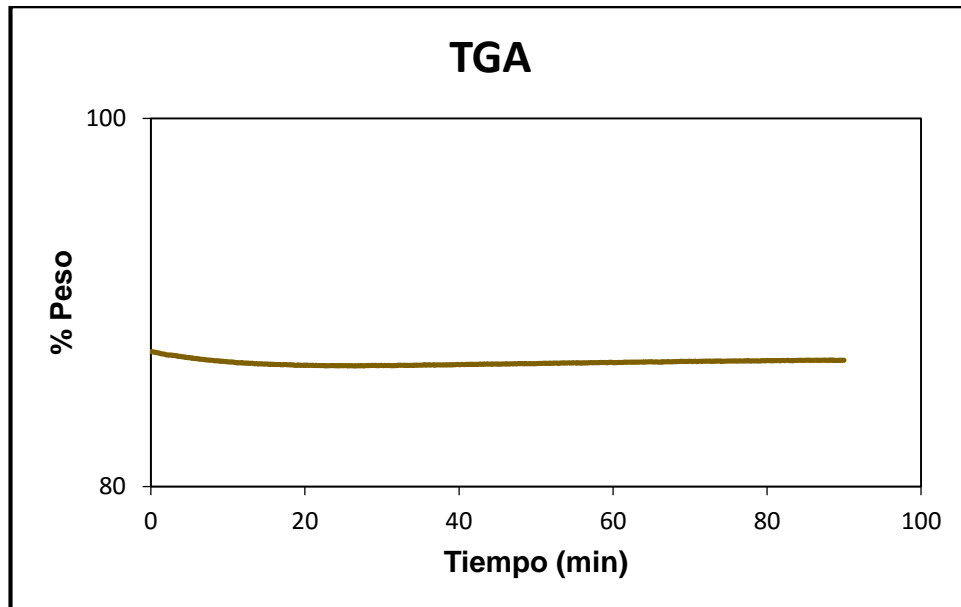
Por lo mencionado anteriormente, entre las temperaturas estudiadas se encuentra como opción óptima la selección de 190 °C, debido a que posee las mejores propiedades mecánicas. No obstante, es importante analizar a qué tiempo de trabajo ( $t_w$ ) se fabricarán las muestras; ya que, se ha encontrado que las propiedades disminuyen a tiempos excesivos ( $t_w \geq 60$  min).

Existen diversas razones por el que la resistencia de flexión disminuye a un tiempo de trabajo ( $t_w$ ) mayor a 50 min a una  $T_w$  de 190°C; entre ellas, se puede analizar las siguientes:

- Presencia de humedad en la madera:

Para comprobar la posible existencia de humedad en la capirona durante el proceso de fabricación del CPM y reforzar la decisión de no secar la madera antes de fabricar el compuesto (una etapa más al proceso y mayor costo), se ha realizado un análisis termogravimétrico a temperatura constante de 190°C durante 80 minutos. Por tanto, en la **Figura 3.16**, se visualiza el termograma obtenido del ensayo; así se comprueba que en segundos se ha extraído 12,7% de humedad de la madera. Comparando este resultado con lo determinado anteriormente en la caracterización de la madera ( $12,77 \pm 0,23$  %) se verifica que no es necesario secar la madera antes de la fabricación del CPM. A la vez, se puede observar que el porcentaje de

humedad extraído continúa disminuyendo hasta 13,4% a 15 minutos y a partir de allí se mantiene constante durante el ensayo.



**Figura 3.16.** Termogrrama TGA de la capirona a  $T_w = 190$  °C constante

- Adhesión entre matriz y refuerzo:

Para corroborar la adhesión entre el PP y las partículas de capirona, se realizará un análisis con un microscopio electrónico de barrido (SEM) de las fracturas del ensayo de flexión, dando énfasis en las regiones de contacto matriz y partículas de madera.

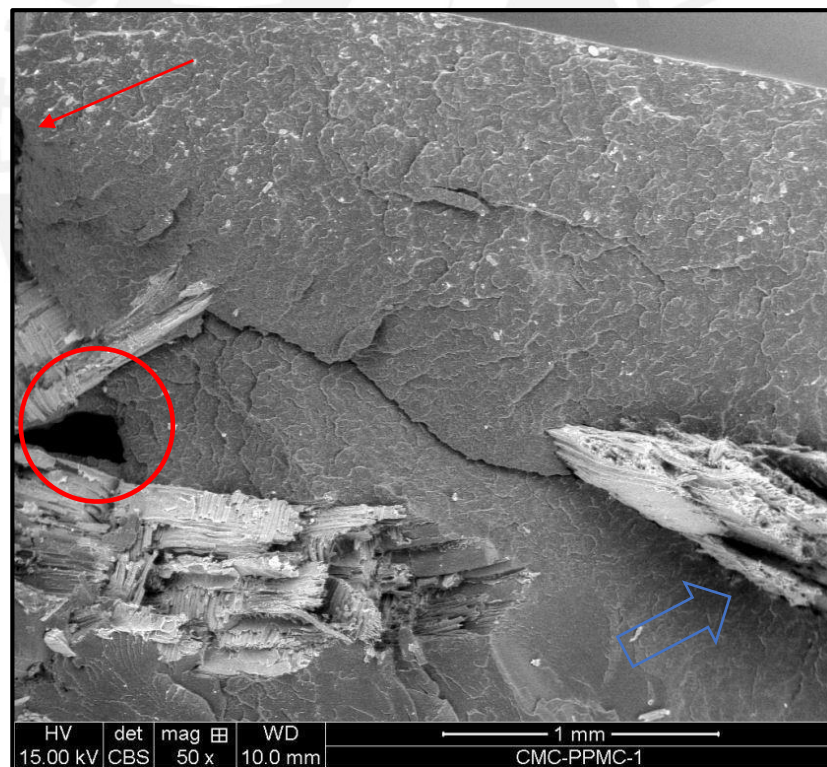
Por tanto, se ha utilizado el SEM para analizar 4 muestras de CPM fabricados a la  $T_w$  de 190°C y a diversos tiempos (30, 40, 50, 60 min). Con este análisis se encontró que, en la muestra de 30 min, el PPR no ha embebido completamente a la madera, presentándose cavidades profundas o vacíos interfaciales entre matriz y refuerzo, lo cual corrobora que a esos parámetros de fabricación se presenten propiedades menores, ya que el proceso de sinterizado no ha concluido y la adhesión es débil (véase **Figura 3.17**).

En el caso del CPM a  $t_w$  de 60 min, se observa que la adhesión en la interface plástico-madera es buena; sin embargo, existen defectos cerca de la región de

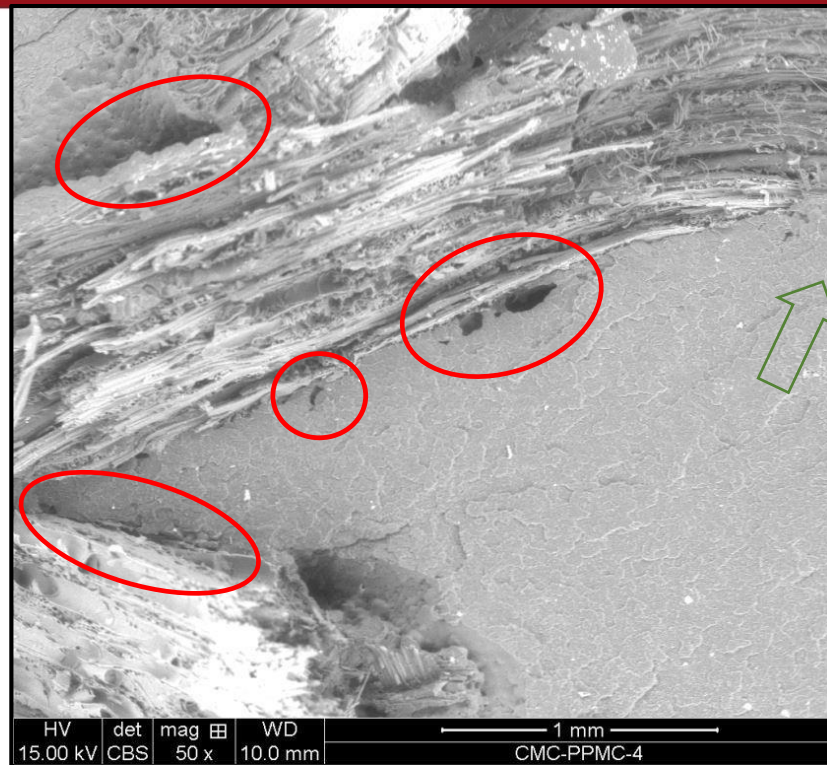
contacto, reduciendo la transferencia de carga y, por ende, la disminución de propiedades mecánicas (véase **Figura 3.18**).

Por el contrario, en la **Figura 3.19** y **3.20** se puede notar la buena adhesión existente entre PPR-MC fabricado a  $t_w$  igual a 40 min y 50 min respectivamente; ya que, la madera se ha roto al momento del ensayo y no se ha retirado de la matriz dejando espacios (conocido como “pullouts”), por lo que ha existido buena transferencia de carga y esto se puede observar en el aumento de rigidez para las condiciones mencionadas.

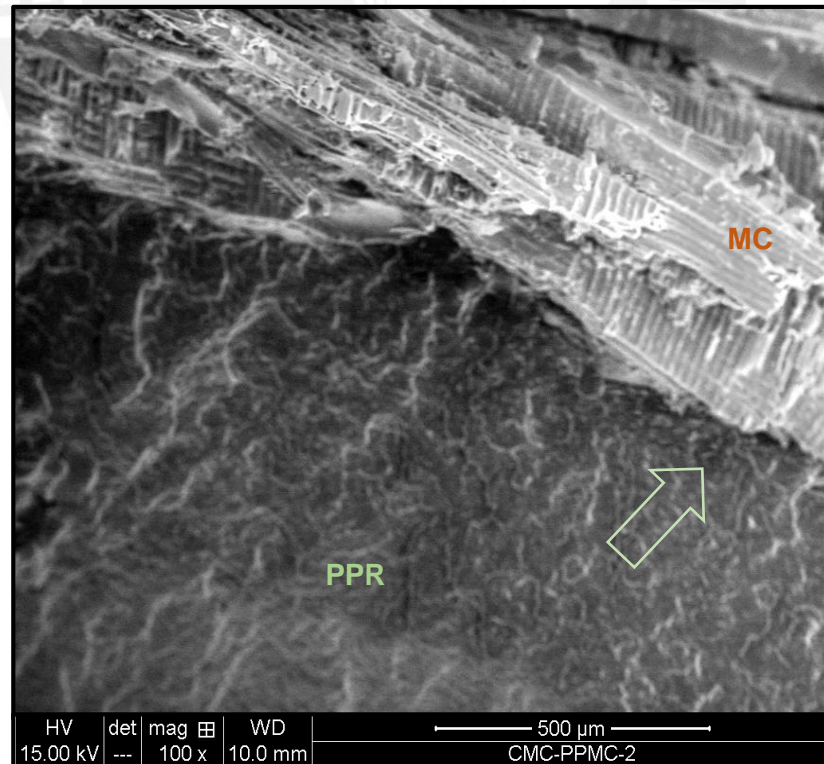
Considerando este análisis y verificando la coalescencia entre las partículas de PPR y MC con el SEM para la  $T_w = 190\text{ }^\circ\text{C}$  y  $t = 50\text{ min}$ , se selecciona los parámetros de trabajo involucrados en la fabricación del CPM indicados en la **Tabla 3.21**.



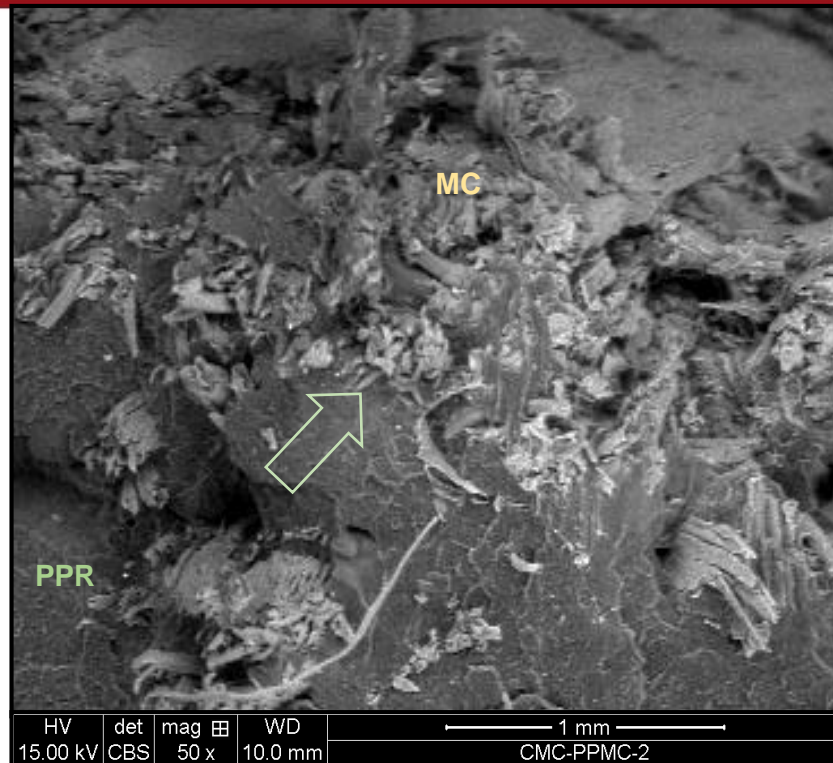
**Figura 3.17.** Micrografía SEM de la superficie fracturada a partir del ensayo de flexión del CPM con proporción 70%PP-30%MC a una  $T_w$  de  $190\text{ }^\circ\text{C}$  y un  $t_w$  de 30 min.  $\circ$  y  $\blacktriangledown$ : vacíos interfaciales,  $\blacktriangledown$  falta de coalescencia entre PPR y MC.



**Figura 3.18.** Micrografía SEM de la superficie fracturada a partir del ensayo de flexión del CPM con proporción 70%PP-30%MC a una  $T_w$  de 190°C y un  $t_w$  de 60 min. ○: Defectos, ↘: buena adherencia.



**Figura 3.19.** Micrografía SEM de la superficie fracturada a partir del ensayo de flexión del CPM con proporción 70%PP-30%MC a una  $T_w$  de 190°C y un  $t_w$  de 40 min. ↘: Partículas de madera embebidas por el plástico.



**Figura 3.20.** Micrografía SEM de la superficie fracturada a partir del ensayo de flexión del CPM con proporción 70%PP-30%MC a una  $T_w$  de 190°C y un  $t_w$  de 50 min. ↘ : Partículas de madera embebidas por el plástico.

**Tabla 3.21** Condiciones de trabajo para la fabricación de CPM de PPR y MC

Variable evaluada	Valor	Tolerancia
Temperatura de trabajo medido en el molde (°C)	190	± 3
Tiempo de permanencia de la muestra a la $T_w$ (min)	50	± 2
Presión máxima aplicada (bar)	70	± 1
Tiempo de prensado y enfriamiento (min)	10	± 2

Por tanto, en la “Parte Experimental II” se analizará el comportamiento de las muestras del CPM fabricadas con las condiciones de trabajo mencionadas, variando la cantidad y tamaño de partícula de madera capirona.

### 3.4 Resultados y discusión de los ensayos mecánicos, físicos y térmicos del material compuesto

En la “Parte Experimental II”, se realizaron diversos ensayos mecánicos, físicos y térmicos del CPM fabricado a una  $T_w$  de 190 °C y un  $t_w$  de 50 min, con la finalidad de conocer el comportamiento del material y el proceso de sinterizado al cambiar la cantidad en volumen (desde 30% hasta 50% de MC) y tamaño de partícula de capirona (en el intervalo de 5,15 – 3,33 mm). Por ello, es imprescindible conocer las variables a evaluar en cada uno de los ensayos como se enseña en la **Tabla 3.22**.

**Tabla 3.22** Variables a evaluar de los diversos ensayos realizados al CPM

VARIABLES A EVALUAR	SÍMBOLO	UNIDAD
Resistencia a la flexión	$R_b$	MPa
Módulo elástico en flexión	$E$	MPa
Resistencia a la tracción	$R_t$	MPa
Módulo elástico en tracción	$E_t$	MPa
Resistencia al impacto	$R_i$	$\text{kJ/m}^2$
Densidad	$\rho_{\text{CPM}}$	$\text{g/cm}^3$
Absorción de agua	$A_{\text{CPM}}$	%

#### 3.4.1 Ensayo de flexión

Con los resultados encontrados a partir del ensayo de flexión de las probetas del CPM, se obtienen gráficas que permiten analizar éstas propiedades mecánicas para cada cantidad en volumen y tamaño de partícula de capirona. En la **Figura 3.21** se muestra los resultados para el tamaño de partícula MR2 ( $\leq 3,33$  mm) y se observa una pequeña dispersión entre los valores encontrados, lo cual se puede verificar mediante el coeficiente de correlación ( $R^2$ ) igual a 0,9818. De la misma forma se analiza los resultados obtenidos para los otros tamaños de partícula.

Por tanto, en la **Figuras 3.22** se observa el resultado promedio de resistencia a la flexión para el material compuesto con tamaño MR2 y para el PPR sin partícula de madera. Así, se nota que la resistencia a la flexión en el compuesto es menor respecto al puro. Lo cual se debe principalmente a la interacción existente entre PPR y MC. Si bien es cierto, el compuesto presenta una buena adhesión, pero esta es física y no química; ya que, se trata de dos materiales de pobre incompatibilidad: un hidrofóbico (PPR) y un hidrofílico (MC).

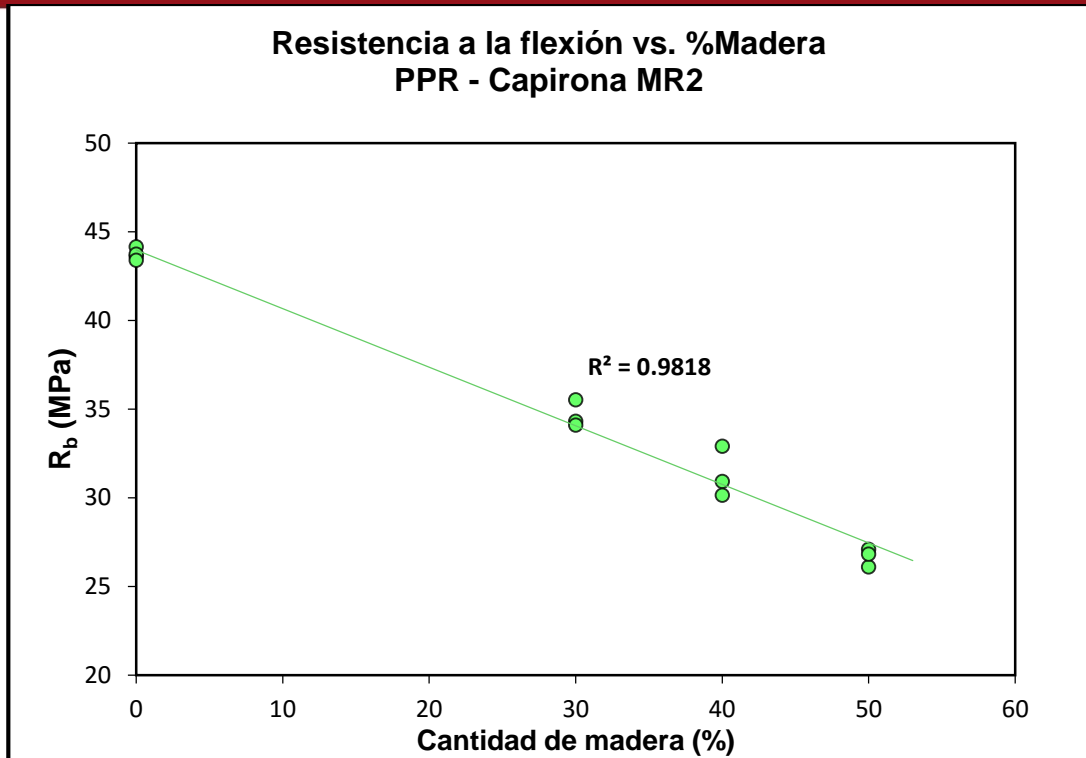
La ausencia de una interacción química entre la matriz y refuerzo se puede comprobar mediante el ensayo de FTIR-ATR realizado al compuesto (véase **Figura 3.23**). En la **Tabla 3.23** se puede observar los valores de los picos característicos obtenidos para el FTIR-ATR de la madera capirona y en la **Tabla 3.24** se presenta los valores de los picos encontrados al analizar los espectros del material compuesto. Por tanto, se compara cada uno de estos picos con el ensayo realizado anteriormente para el PPR puro y la madera capirona, encontrándose que efectivamente no existe ningún otro espectro que señale una interacción química entre PPR y MC, solo hay una interacción física, ya que se puede observar los picos referenciales de los materiales implicados.

**Tabla3.23** Bandas características representativas de la madera capirona

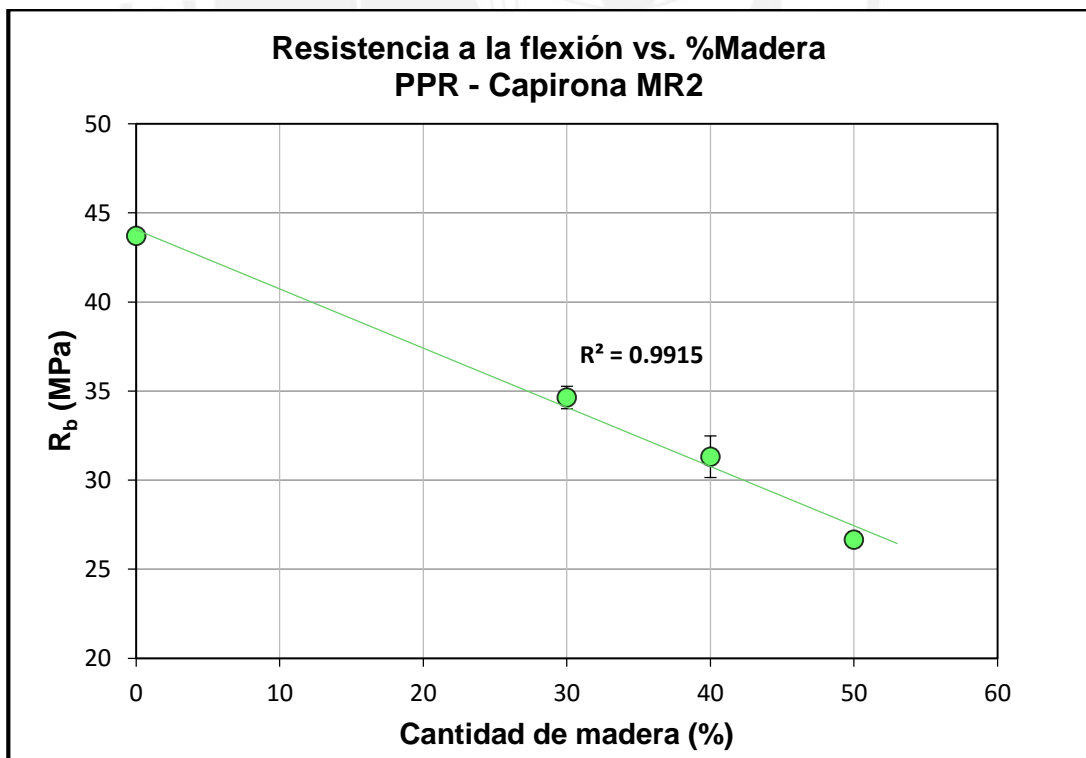
Número de onda (cm <sup>-1</sup> )	Banda característica	Referencia
3340	Vibraciones O–H (puente de hidrógeno)	Pandey, 1998
2901	Vibraciones asimétricas C–H en grupos metileno	Ming-Yu, 2015
1735	Vibraciones C=O de carbonilo, carboxilo y grupos acetilo	Ming-Yu, 2015
1594	Vibraciones C=C de anillos aromáticos en lignina	Ming-Yu, 2015
1505	Vibraciones C=C de anillos aromáticos en lignina	Pandey, 2003
1461 - 1422	Deformación C-H en lignina y carbohidratos	Ming-Yu, 2015
1368	Deformación C–H en celulosa y hemicelulosa	Ming-Yu, 2015
1318	C–O de anillo siringil	Pandey, 1998
1230	Vibraciones C–O del grupo fenol, junto con la vibración del anillo aromático en lignina y vibraciones C–O en xiloglucano	Ming-Yu, 2015
1103	Vibraciones C–O–C en celulosa y hemicelulosa	Ming-Yu, 2015
1030	Vibraciones C-O (celulosa, hemicelulosa y lignina)	Shi, 2012
897	Deformación C-H en celulosa	Pandey, 2003

**Tabla3.24** Bandas características del material compuesto

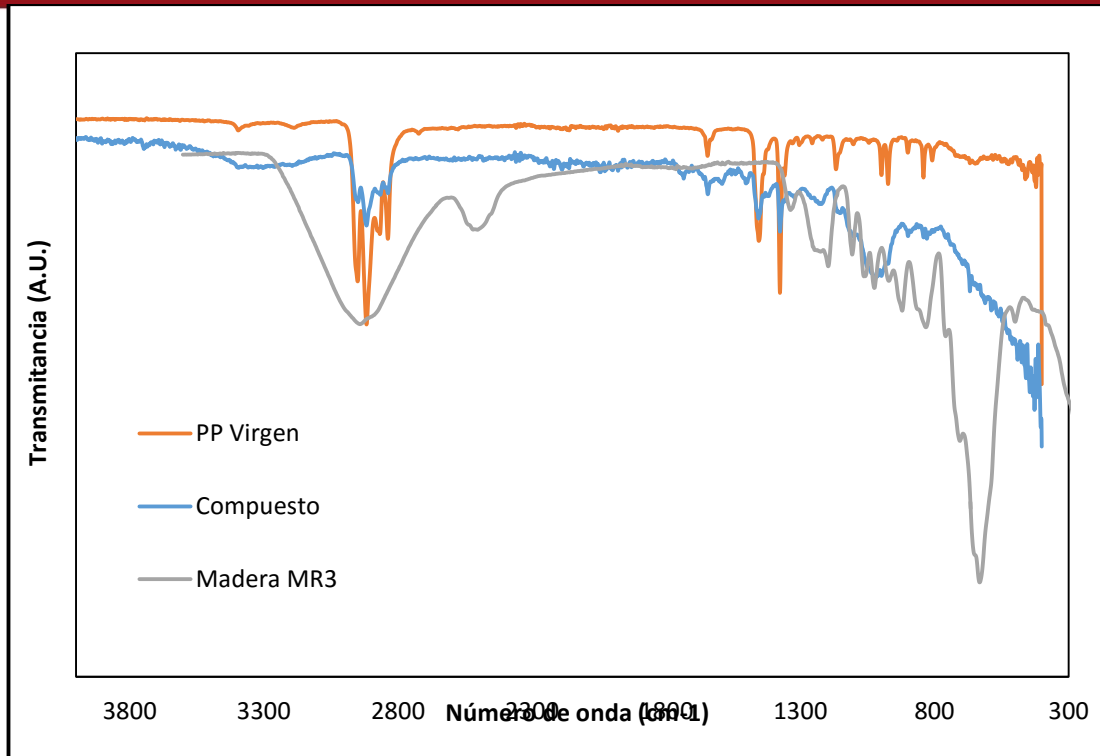
Número de onda (cm <sup>-1</sup> )	Banda característica	Referencia
2952, 2917,	Vibraciones C–H	Kazcmarek, 2005
1458	Deformación asimétrica CH <sub>3</sub>	Kazcmarek, 2005
1376	Deformación simétrica CH <sub>3</sub>	Kazcmarek, 2005
1022	Vibraciones C-O (celulosa, hemicelulosa y lignina)	Shi, 2012



**Figura 3.21.** Resistencia a la flexión vs. %Cantidad de madera capirona tamaño MR2 ( $\leq 3,33$  mm): se observa la dispersión de valores y la tendencia de estos.



**Figura 3.22.** Resistencia a la flexión vs. %cantidad de madera capirona tamaño MR2 ( $\leq 3,33$  mm): se observa que la resistencia a la flexión disminuye al aumentar la cantidad de madera.



**Figura 3.23.** Espectro del material compuesto y de la materia prima por separado.

Por otra parte, se observa que al incrementar la cantidad en volumen de partículas de madera, la resistencia disminuye. Este comportamiento se puede deber también a la heterogeneidad del compuesto; es decir, la distribución de la madera en la matriz se dificulta a mayor cantidad de capirona y es mucho más difícil que el termoplástico bañe a todas las partículas de madera, quedando espacios vacíos y disminuyendo la resistencia a la flexión.

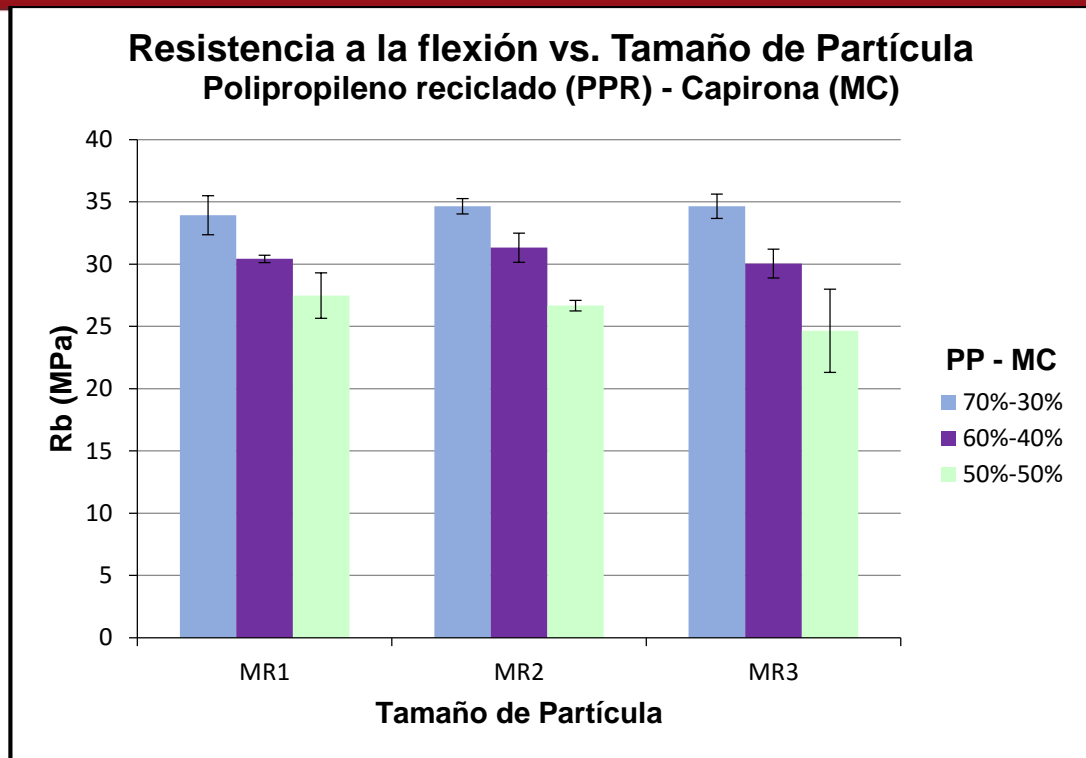
En la **Tabla 3.25**, se presenta los valores promedios de resistencia encontrados en el ensayo de flexión, por lo que se puede observar que el tamaño de partícula no influye significativamente en las propiedades del compuesto (véase **Figura 3.24**). Por ejemplo, en el caso del compuesto donde se observa mayor resistencia (70%PPR-30%MC), para el tamaño de partícula MR1, MR2 y MR3 las resistencias son:  $33,92 \pm 1,56$  MPa,  $34,64 \pm 0,62$  MPa y  $34,65 \pm 0,98$  MPa respectivamente, los cuales considerando el margen de error son de valores similares.

Estudios previos reportan que se ha tratado de mejorar la adhesión entre plástico y madera, para ello se ha utilizado diversos agentes acoplantes o pretratamiento en la superficie de la madera. Estos acoplantes son seleccionados para formar enlaces químicos entre la celulosa de la madera y la matriz polimérica (citado en Torres

2005). De tal manera que en el caso estudiado por Nuñez (2002) para materiales compuestos con PP y madera eucalipto saligna, se ve que la resistencia del material compuesto disminuye respecto al plástico puro. Por tanto, con la finalidad de incrementar ésta propiedad Nuñez utilizó un anhídrido maleico en el compuesto, obteniendo un incremento de la resistencia a la flexión de 7,9% y disminuciones de 16,5% con respecto al compuesto sin tratamiento; sin embargo, no logró sobrepasar el valor de resistencia del polipropileno puro. Estos resultados permiten analizar si el incremento de un proceso y el uso de un acoplante o tratamiento para mejorar en porcentajes bajos algunas propiedades en el material compuesto es una decisión certera, pues esto no solo incrementa los costos en el proceso si no también reduce el cuidado del medio ambiente al usar químicos.

**Tabla 3.25** Resultados de resistencia a la flexión del CPM

Mezcla	$R_{b\text{ PROM}}$ (MPa)	Desviación estándar	CV (%)
100%PP	43,72	0,28	0,64
70%PP-30%MR1	33,92	1,56	4,61
70%PP-30%MR2	34,64	0,62	1,80
70%PP-30%MR3	34,65	0,98	2,84
60%PP-40%MR1	30,42	0,29	0,97
60%PP-40%MR2	31,32	1,17	3,72
60%PP-40%MR3	30,04	1,15	3,84
50%PP-50%MR1	27,47	1,83	6,68
50%PP-50%MR2	26,66	0,42	1,57
50%PP-50%MR3	24,64	3,33	13,52

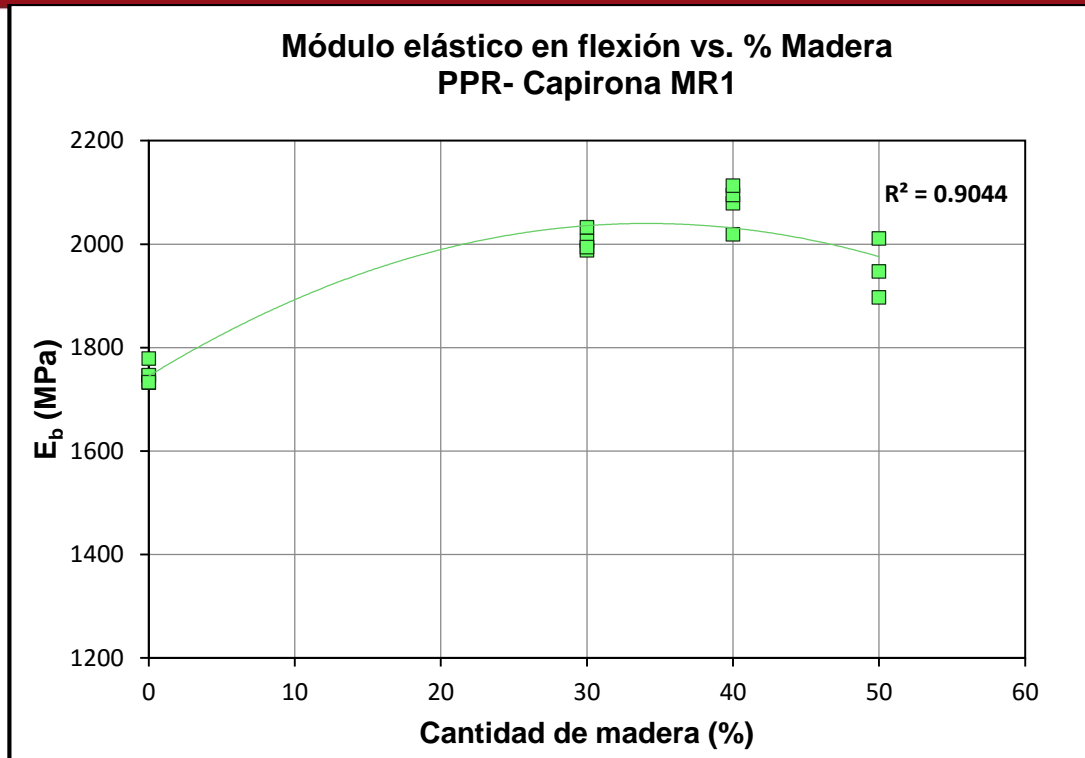


**Figura 3.24.** Resistencia a la flexión vs. Tamaño de partícula de capirona: se observa que la resistencia a la flexión disminuye al aumentar la cantidad de madera, pero no se observa variación significativa al disminuir el tamaño de partícula. Los tamaños de partícula de madera son: MR1  $\leq$  5,15 mm, MR2  $\leq$  3,33 mm y MR3  $\leq$  1,90 mm.

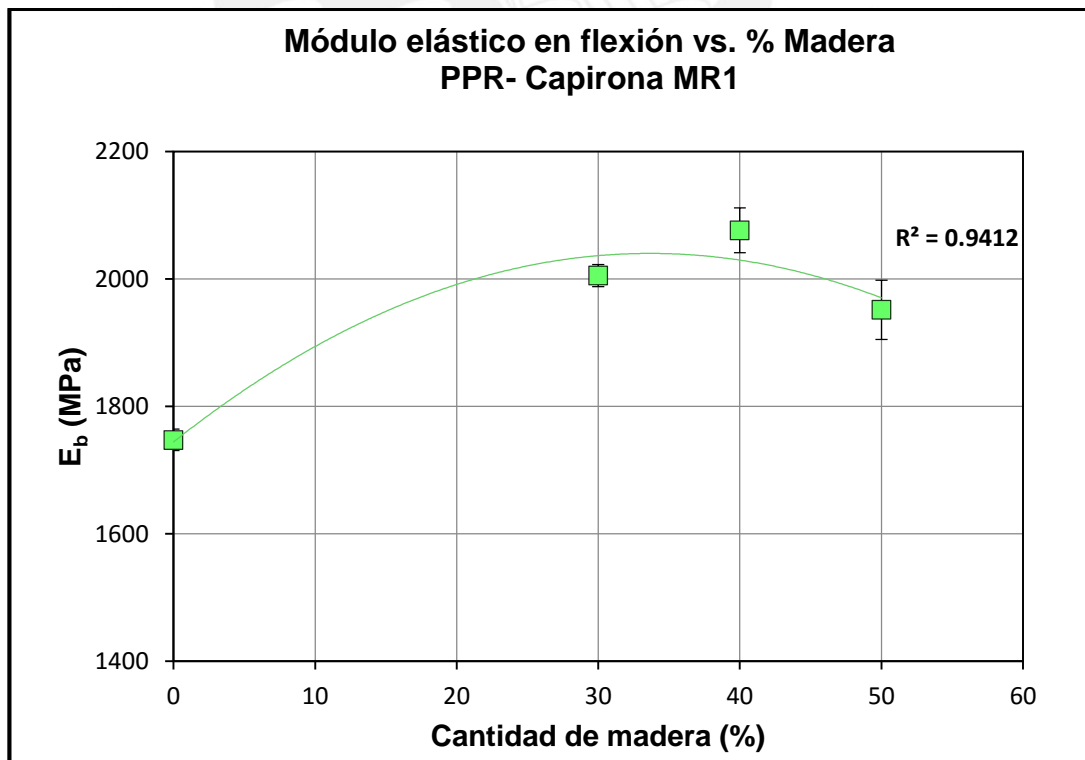
En la **Figura 3.25**, se observa los resultados de módulo elástico en flexión para un tamaño de partícula MR1 ( $\leq$  5,15 mm). En esta gráfica se observa la reducida dispersión de los resultados con un  $R^2$  igual a 0,9044.

Por tanto, se puede notar que la madera actúa como refuerzo y aumenta el módulo elástico en flexión (E), lo cual indica que la matriz es suficiente para cubrir a la madera. Tal y como se observa, en la **Figura 3.26**, el módulo elástico promedio aumenta hasta encontrar un máximo con contenido de 40% en volumen de madera y luego el valor de E disminuye. En otras palabras, a mayores cantidades de madera es más difícil que estas sean completamente embebidas por el PPR.

Por otro lado, el E no se ve afectado con el tamaño de partícula tal y como se puede observar en la **Figura 3.27** y de acuerdo a los valores promedios de la **Tabla 3.26**.



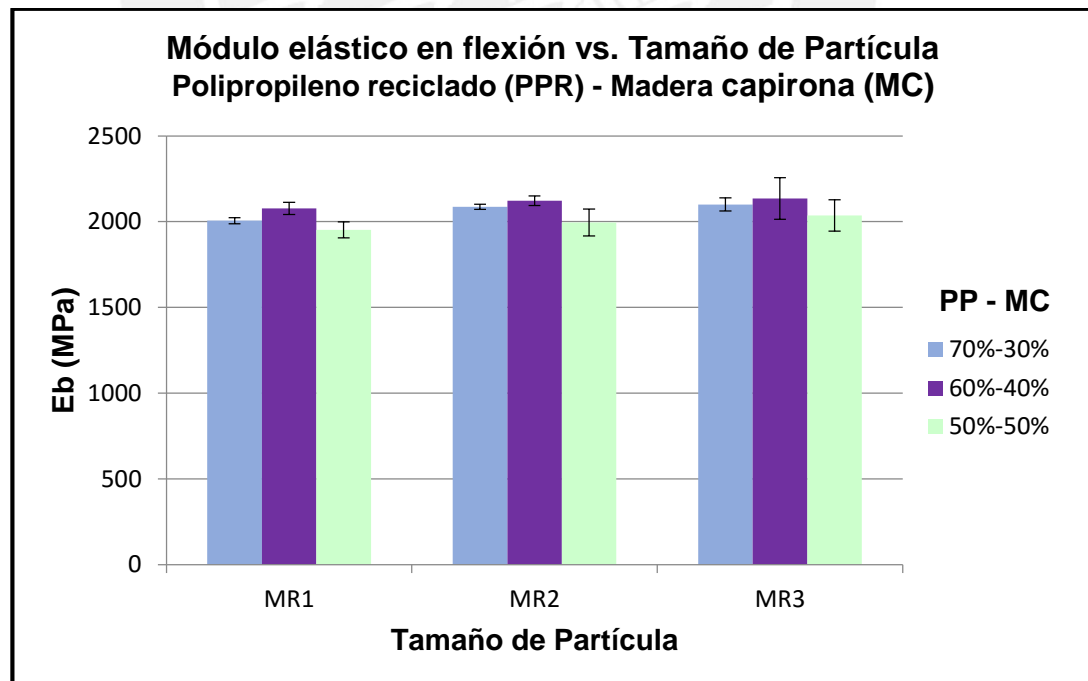
**Figura 3.25.** Módulo elástico en flexión vs. %Cantidad de madera capirona tamaño MR1 ( $\leq 5,15$  mm): Se observan la dispersión de valores obtenidos en el ensayo y la tendencia de éstos.



**Figura 3.26.** Módulo elástico promedio en flexión vs. %Cantidad de madera capirona tamaño MR1 ( $\leq 5,15$  mm).

**Tabla 3.26** Resultados del módulo de elasticidad en flexión del CPM

Mezcla	$E_b$ PROM (MPa)	Desviación estándar	CV (%)
100%PP	1740,43	4,11	0,24
70%PP-30%MR1	2005,51	17,19	0,86
70%PP-30%MR2	2086,60	15,51	0,74
70%PP-30%MR3	2100,64	38,66	1,84
60%PP-40%MR1	2076,59	35,40	1,70
60%PP-40%MR2	2121,98	27,66	1,30
60%PP-40%MR3	2134,73	121,68	5,70
50%PP-50%MR1	1951,70	46,47	2,38
50%PP-50%MR2	1995,19	78,63	3,94
50%PP-50%MR3	2036,06	91,05	4,47



**Figura 3.27.** Módulo elástico en flexión vs. Tamaño de partícula de capirona (MR1  $\leq$  5,15 mm, MR2  $\leq$  3,33 mm y MR3  $\leq$  1,90 mm). El módulo elástico no se ve afectado significativamente por el tamaño de partícula de madera.

Por último, en la **Tabla 3.27** se presentan los resultados del ensayo de flexión de la madera capirona realizados por el investigador Smith (2012). Así, al contrastar ambos resultados, la resistencia a la flexión y el módulo elástico del CPM son mayores que los valores de la madera capirona en dirección transversal a la orientación de las fibras y menores que las de dirección longitudinal.

**Tabla 3.27** Resistencia y módulo elástico en flexión de la capirona (Smith, 2012)

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
Módulo elástico en flexión (fibra longitudinal)	13 526

#### 3.4.2 Ensayo de tracción

De acuerdo a Ward-Perron, las propiedades de tracción están relacionadas a la presencia de altas concentraciones de defectos que se encuentran en la superficie de la muestra. Asimismo, Nuñez (2003) explica que el ensayo de tracción es más sensible a la presencia de defectos, poros, vacíos en la muestra comparado con el ensayo de flexión. Por tanto, en la **Figura 3.28, 3.29 y 3.30**, se presenta unas imágenes a 8X de las secciones transversales de cada una de las muestras, con la finalidad de analizar los poros presentes en el material compuesto

Tal y como se puede observar, a mayor cantidad de madera existen más poros y a mayor tamaño de partícula las dimensiones del poro son mayores. Por lo tanto, las muestras cuya composición son 70% de PPR y 30% de MC presentan menos cantidades de poros y su resistencia a la tracción debe ser mayor que las obtenidas con las otras cantidades de madera y plástico. Por otra parte, se observan poros más pequeños al utilizar la partícula MR3 ( $\leq 1,9$  mm) con excepción de la muestra obtenida con 50% de PPR y 50% de MC.

Tamaño MR1 ( $\leq 5,15$  mm)

a)  
70%PPR – 30%MC  
Se observa que casi no hay poros y también se corrobora que las partículas de madera son embebidas por el plástico. El poro encontrado mide 0,7 mm.



b)  
60%PPR – 40%MC  
Se observa la presencia de poros cerca a la interfase aunque existe la coalescencia entre el plástico y la madera. El tamaño de poro promedio es de 1,7 mm.



c)  
50%PPR – 50%MC  
La presencia de poros es alta, además el tamaño de poro es mayor. El poro indicado presenta una longitud de 2,4 mm.

**Figura 3.28.** Imágenes en el estereocopio para observar los poros en la sección transversal de las probetas de tracción del CPM para partículas menores iguales a 5,15 mm (MR1) con una proporción de 30% de capirona.

**Tamaño MR2 ( $\leq 1,90$  mm)**


a)

70%PPR – 30%MC

Se observa que existen pocos poros con tamaños desde 1,3 mm a 0,4 mm.



b)

60%PPR – 40%MC

Se observa la presencia de poros, cuyos tamaños están en el rango de 0,4 y 1,3 mm.



c)

50%PPR – 50%MC

Se observa la presencia de poros, cuyos tamaños están en el rango de 0,3 y 0,9 mm.

**Figura 3.29.** Imágenes en el estereocopio para observar los de poros en la sección transversal de las probetas de tracción del CPM para partículas menores iguales a 3,33 mm (MR2) con una proporción de 30% de capirona.

**Tamaño MR3 ( $\leq 1,90$  mm)**


a)  
70%PPR – 30%MC  
Para este tamaño de partícula se observan pequeños defectos



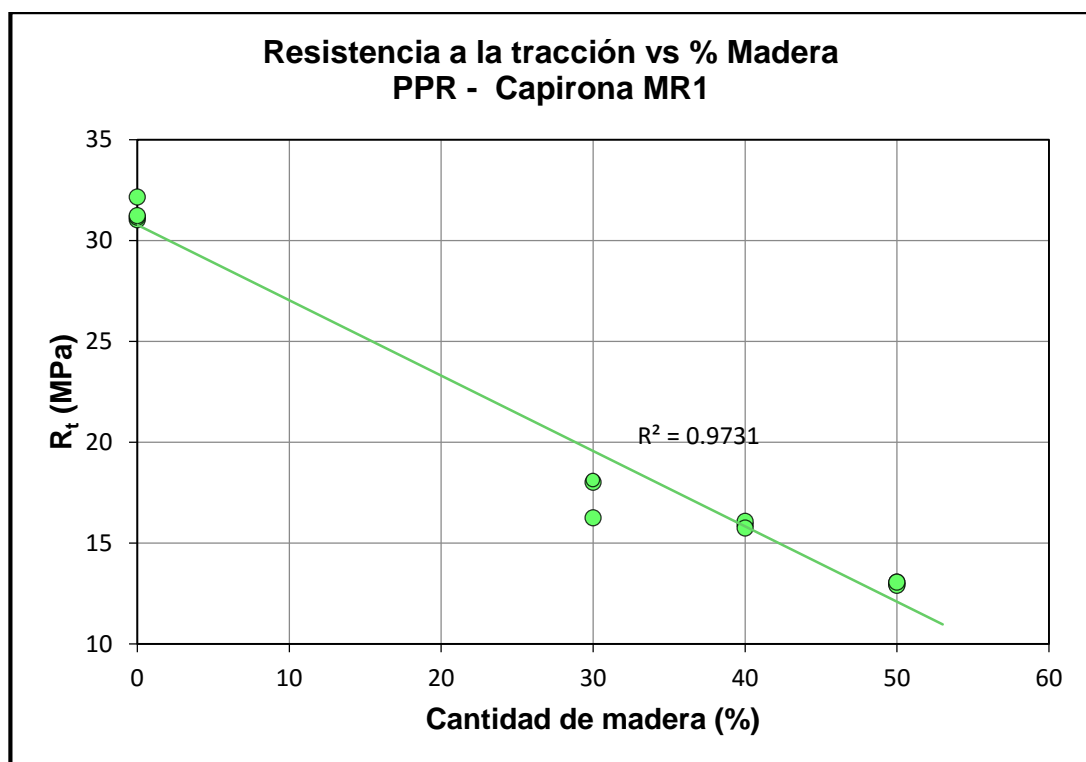
b)  
60%PPR – 40%MC  
Se observa la presencia de poros cerca a la interfase aunque existe la coalescencia entre el plástico y la madera. El ranfo de tamaño de poro abarca: 0,3 a 0,9 mm.



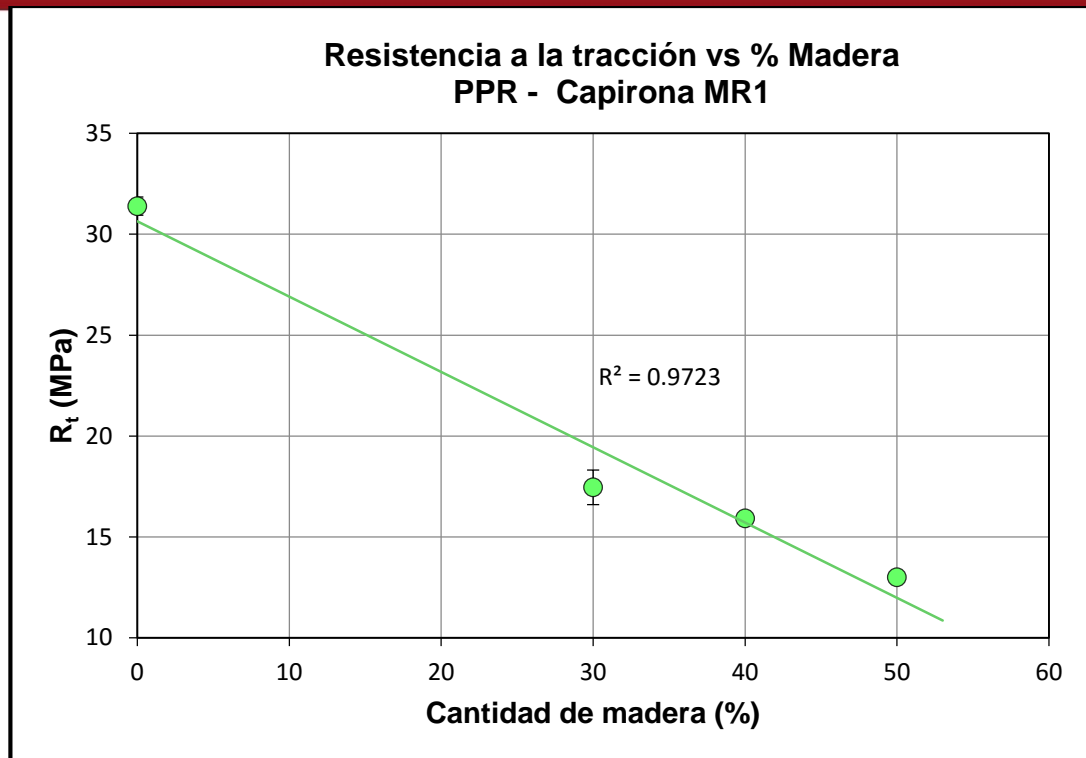
c)  
50%PPR – 50%MC  
La presencia de poros es mayor que las anteriores. El tamaño de poro promedio está en el rango de 0,5 y 1,2 mm.

**Figura 3.30.** Imágenes en el estereoscopio para observar los poros en la sección transversal de las probetas de tracción del CPM para partículas menores iguales a 1,9 mm (MR3) con una proporción de 30% de capirona

Por tanto, con los resultados obtenidos a partir del ensayo de tracción del material compuesto estudiado, se obtienen gráficas que permiten analizar éstas propiedades mecánicas al variar la cantidad en volumen y tamaño de partícula de capirona. Como ejemplo, en la **Figura 3.31** se muestra los resultados para el tamaño de partícula MR1 ( $\leq 5,15$  mm) y se observa una dispersión mínima entre los valores encontrados, lo cual se verifica mediante el coeficiente de correlación ( $R^2$ ) igual a 0,9731. Así, en la **Figuras 3.32** se observa el resultado promedio de resistencia a la flexión para el material compuesto con tamaño MR2 y para el PPR puro, encontrándose que la resistencia a la tracción en el compuesto es menor respecto al plástico reciclado puro fabricado bajo las mismas condiciones.



**Figura 3.31.** Resistencia a la tracción vs. %cantidad de madera capirona tamaño MR1 ( $\leq 5,15$  mm): se observan la dispersión de valores obtenidos en el ensayo y la tendencia de éstos.



**Figura 3.32.** Resistencia a la tracción vs. %cantidad de madera capirona tamaño MR1 ( $\leq 5,15$  mm): se observa que la resistencia a la tracción disminuye al aumentar la cantidad de madera.

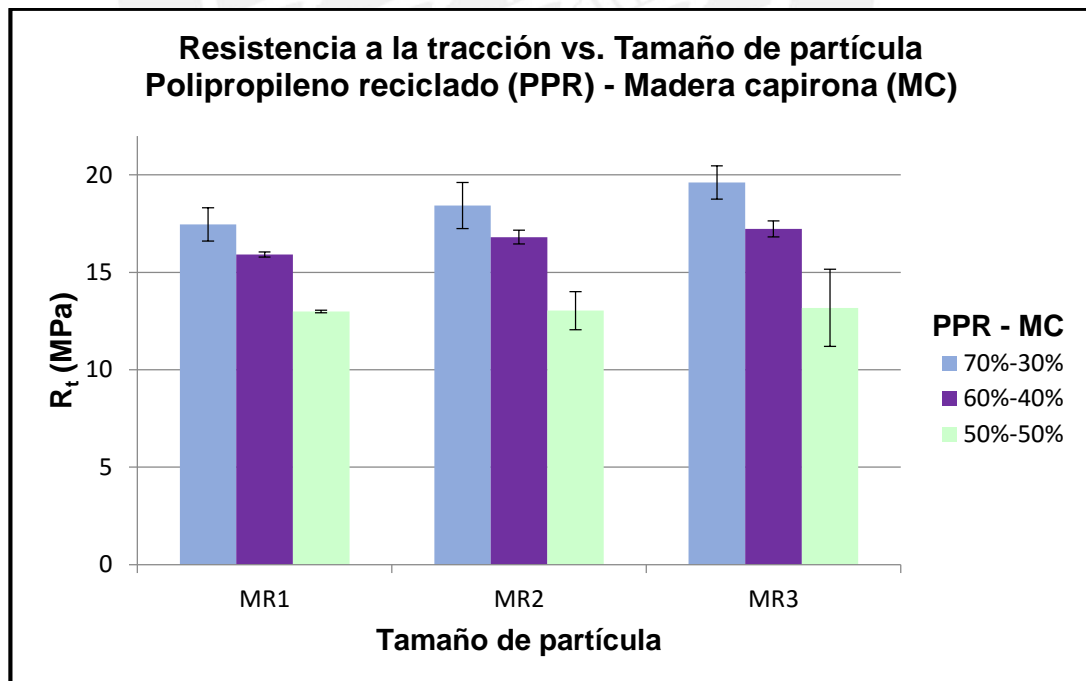
En la **Tabla 3.28** se observa un resumen de todos los resultados promedios de resistencia a la tracción para el CPM y para el PPR puro. Asimismo, en la **Figura 3.33** se presenta un esquema de estos valores al cambiar el tamaño y cantidad (en volumen) de las partículas de madera capirona.

Con cada uno de estos resultados puede corroborar lo analizado con la presencia de poros en la muestra; de esta manera la mayor resistencia a la tracción se presenta donde hay menos cantidad de poros y eso ocurre con el tamaño de partícula MR3 ( $\leq 1,9$  mm) y el porcentaje de madera en volumen es de 30%.

Por otro lado, cabe resaltar que los valores de resistencia a la tracción para la proporción de 50%PPR y 50% de madera, no es influida por el tamaño de partículas, encontrándose valores de  $12,99 \pm 0,07$  MPa,  $13,03 \pm 0,98$  MPa y  $13,19 \pm 1,98$  MPa para los tamaños MR1, MR2 y MR3 respectivamente. Así para las otras proporciones con diferente tamaño de partículas las propiedades difieren como máximo en 12,3% una de otra.

**Tabla 3.28** Resultados de resistencia a la tracción del CPM

Mezcla	$R_t$ PROM (MPa)	Desviación estándar	CV (%)
100%PP	31,39	0,45	1,43
70%PP-30%MR1	17,46	0,86	4,91
70%PP-30%MR2	18,43	1,18	6,41
70%PP-30%MR3	19,61	0,86	4,36
60%PP-40%MR1	15,91	0,14	0,86
60%PP-40%MR2	16,81	0,35	2,10
60%PP-40%MR3	17,23	0,41	2,40
50%PP-50%MR1	12,99	0,07	0,54
50%PP-50%MR2	13,03	0,98	7,49
50%PP-50%MR3	13,18	1,98	15,01



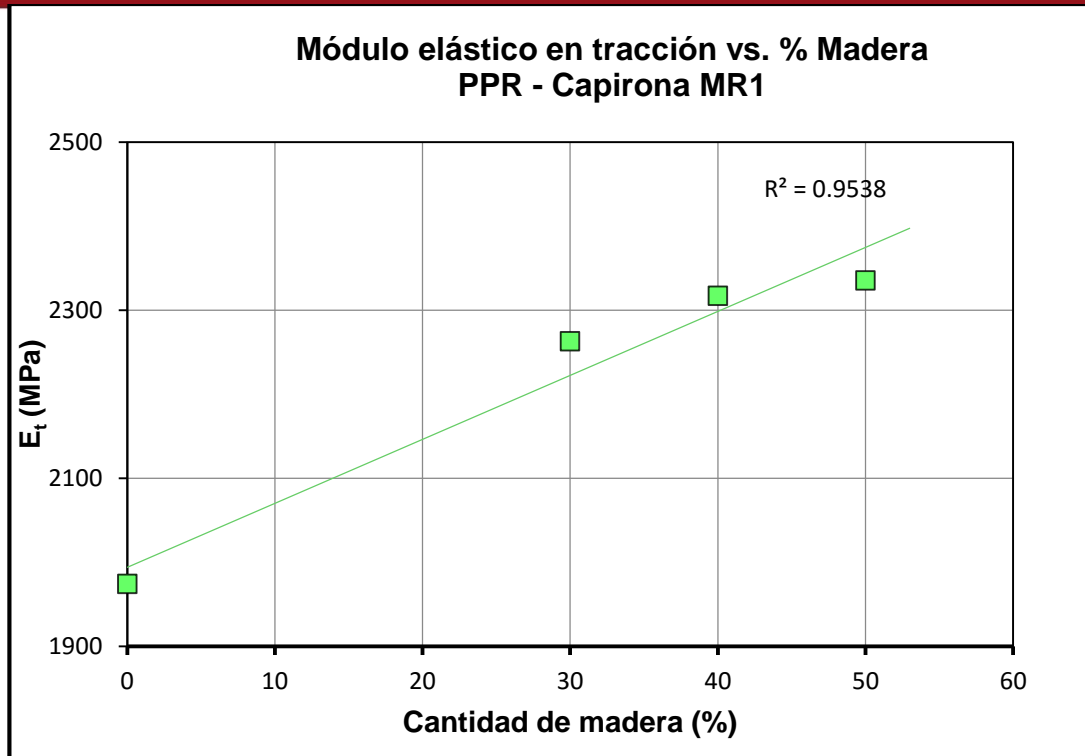
**Figura 3.33.** Resistencia a la tracción vs. Tamaño de partícula de capirona: se observa que la resistencia a la tracción disminuye al aumentar la cantidad de madera y aumenta al disminuir el tamaño de partícula. Los tamaños de partícula de madera utilizados son: MR1  $\leq$  5,15 mm, MR2  $\leq$  3,33 mm y MR3  $\leq$  1,90 mm.

De las **Figura 3.34, 3.35 y 3.36**, se puede notar que el módulo elástico en tracción tiene la tendencia de incrementarse conforme se aumenta la cantidad de madera capirona. Esto se da porque la adhesión entre el PPR y la MC es lo suficientemente fuerte para permitir la transferencia de carga, por lo que se encuentra el módulo a bajas cargas en la zona elástica. Por tanto, el valor máximo de módulo elástico en tracción se da a 50% de madera capirona.

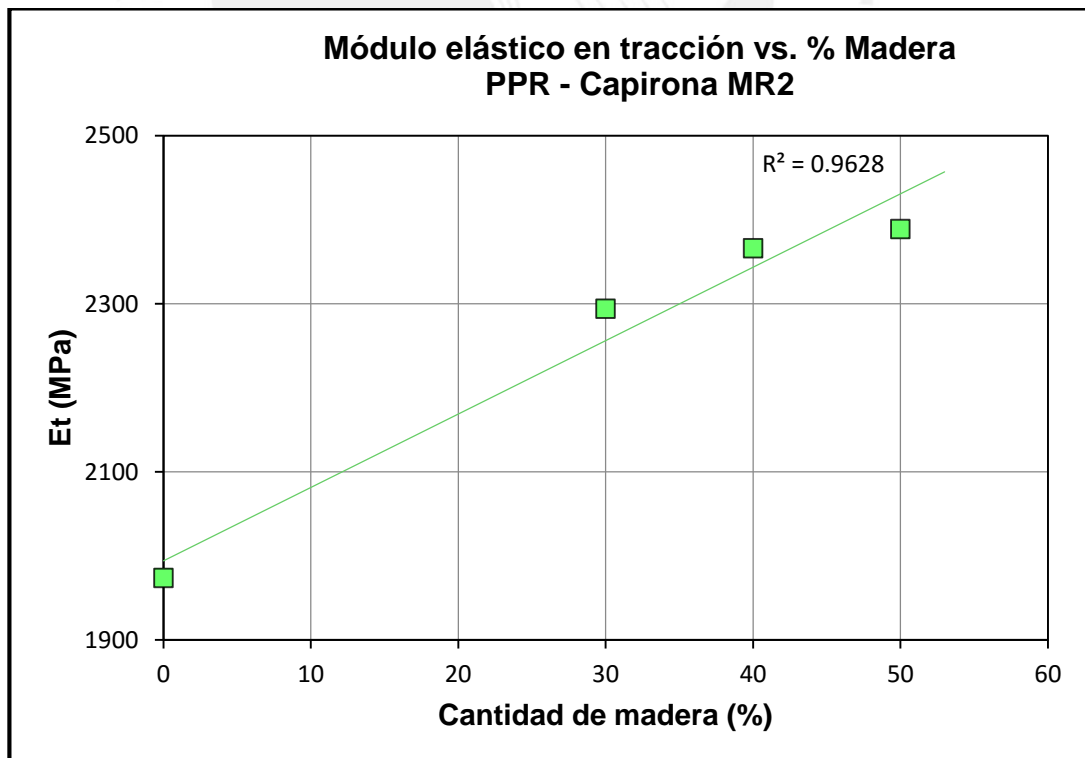
En la **Tablas 3.29** se puede mostrar los resultados del módulo elástico en tracción, del cual se observa que la madera le otorga la propiedad de rigidez al plástico, obteniéndose un compuesto con mayor módulo elástico que el material puro (véase **Figura 3.37**). Además de ello, se observa que si se considera la desviación estándar de cada resultado, el tamaño de partícula no influye considerablemente en los valores de módulo elástico. Un ejemplo se esto se puede observar para el caso de utilizar un tamaño MR3 ( $\leq 1.90$  mm) en el material compuesto.

**Tabla 3.29** Resultados del módulo elástico en tracción del CPM

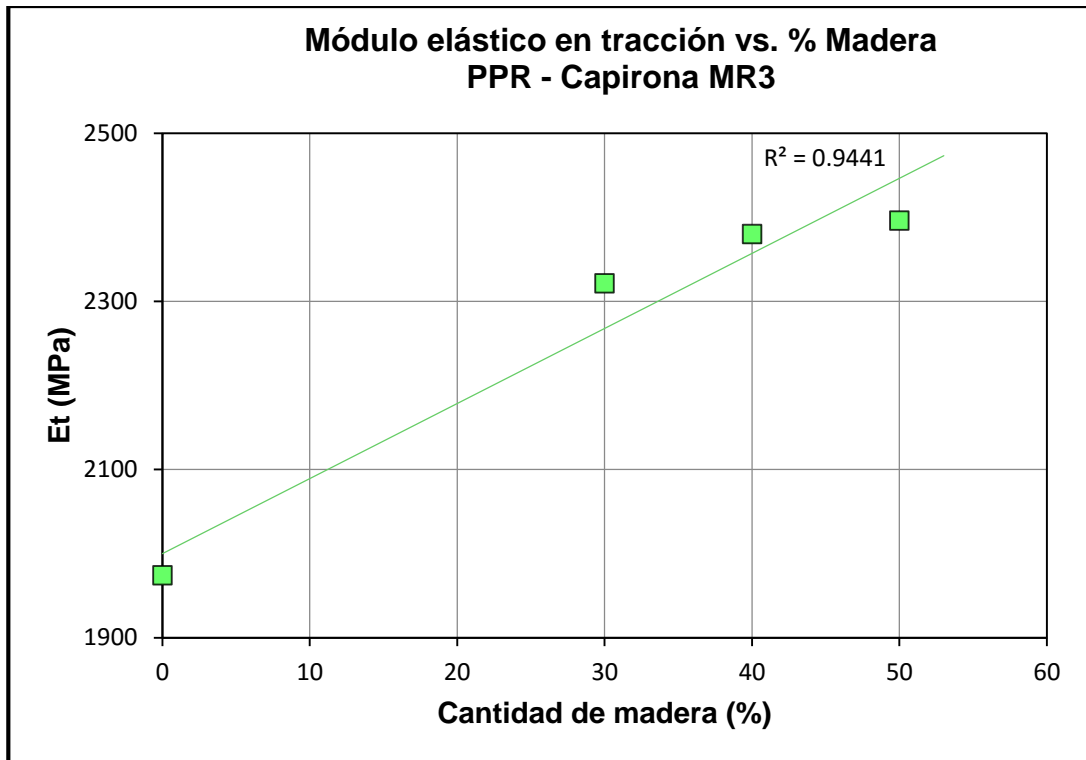
Mezcla	$E_{i PROM}$ (MPa)	Desviación estándar	CV (%)
100%PP	1974,13	6,56	0,33
70%PP-30%MR1	2263,04	74,71	3,30
70%PP-30%MR2	2294,35	47,46	2,07
70%PP-30%MR3	2321,45	104,28	4,49
60%PP-40%MR1	2317,12	159,87	6,90
60%PP-40%MR2	2366,39	88,11	3,72
60%PP-40%MR3	2380,03	132,20	5,55
50%PP-50%MR1	2335,49	100,13	4,29
50%PP-50%MR2	2389,17	63,09	2,64
50%PP-50%MR3	2396,06	55,57	2,32



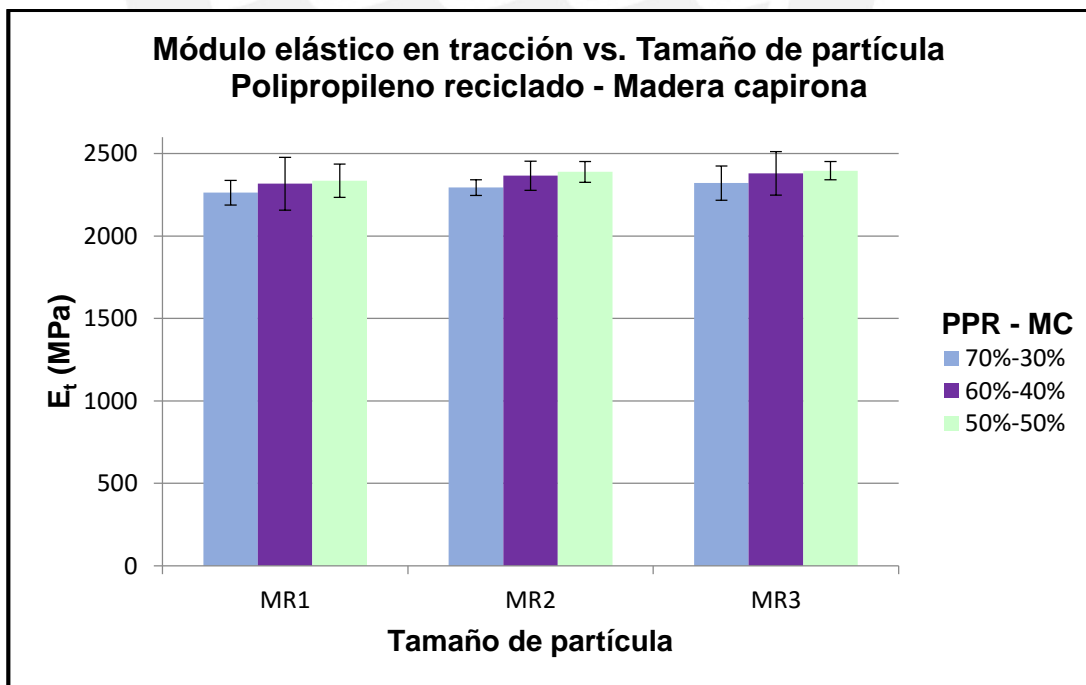
**Figura 3.34.** Módulo elástico promedio en tracción vs. %Cantidad de madera capirona tamaño MR1 ( $\leq 5,15$  mm).



**Figura 3.35.** Módulo elástico promedio en tracción vs. %Cantidad de madera capirona tamaño MR2 ( $\leq 3,33$  mm).



**Figura 3.36.** Módulo elástico promedio en tracción vs. %Cantidad de madera capirona tamaño MR3 ( $\leq 1,9$  mm).



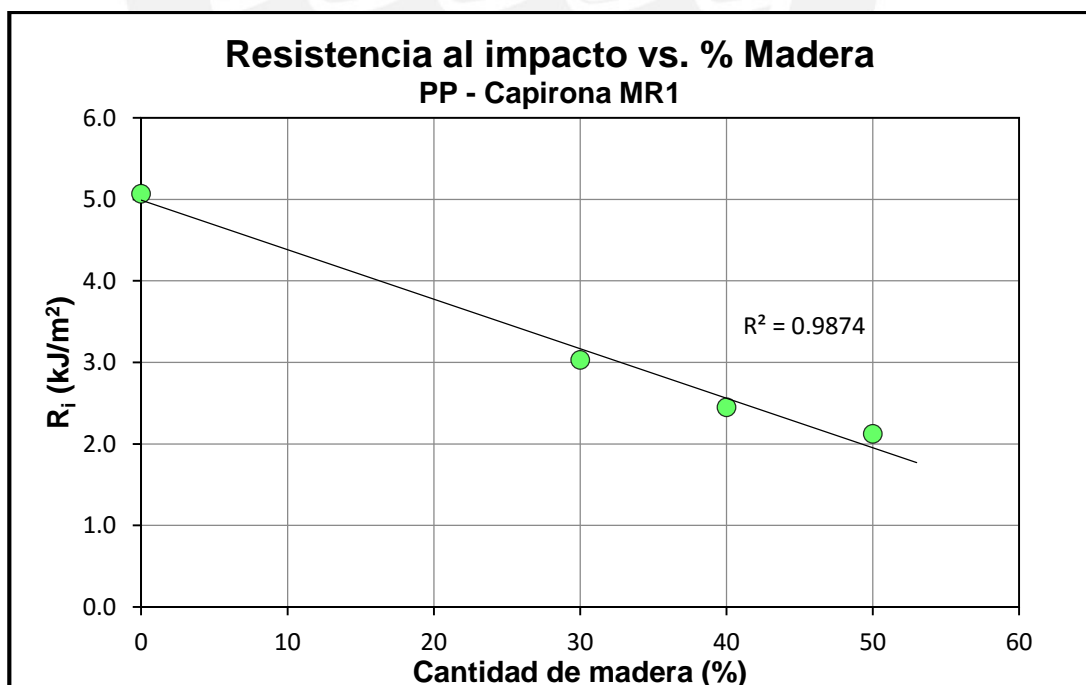
**Figura 3.37.** Módulo elástico en tracción vs. Tamaño de partícula de capirona (MR1  $\leq 5,15$  mm, MR2  $\leq 3,33$  mm y MR3  $\leq 1,90$  mm). El módulo elástico no se ve afectado significativamente por el tamaño de partícula de madera.

### 3.4.3 Ensayo de impacto Charpy

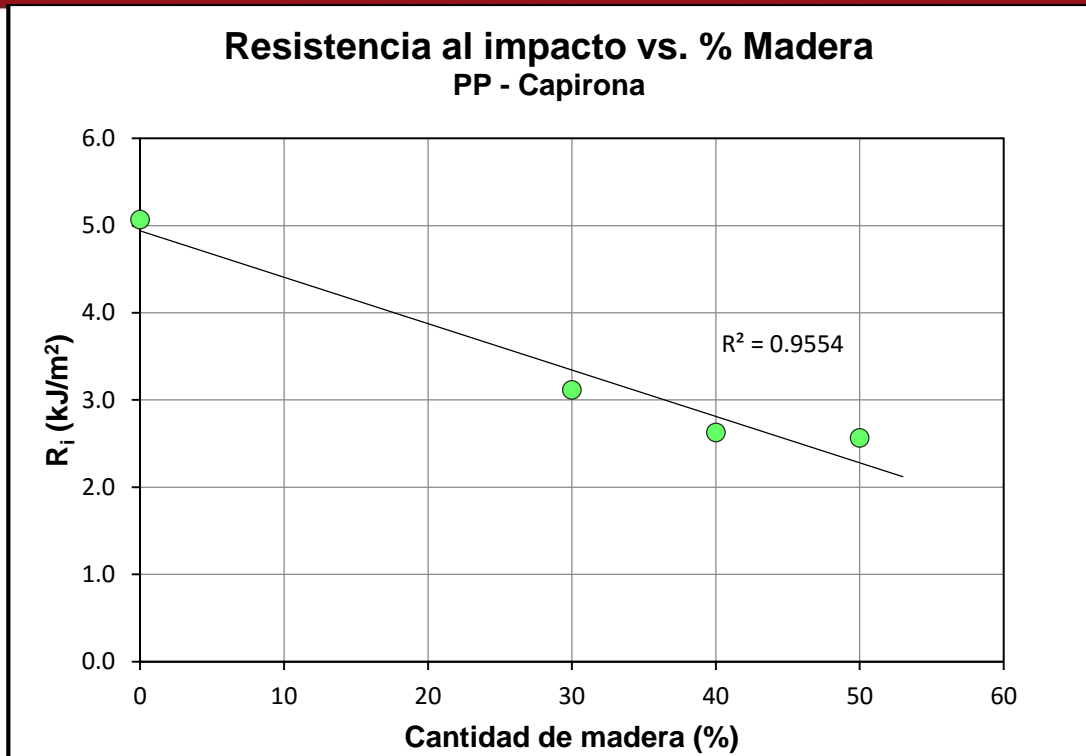
De la misma manera que para los ensayos de flexión y tracción, se ha analizado el coeficiente de correlación ( $R^2$ ), encontrándose que los resultados obtenidos a partir del ensayo de impacto Charpy presentan una ligera dispersión por lo que se colocarán los valores promedios de resistencia al impacto (véase **Figuras 3.38, 3.39 y 3.40**). Así, analizando las diversas gráficas para cada tamaño de partícula por separado (MR1, MR2 Y MR3), se observa que la resistencia al impacto ( $R_i$ ) disminuye conforme se aumenta la cantidad de madera. Estas tendencias también la encontró Hilling (2006).

No obstante, de acuerdo a la **Figura 3.41**, se puede concluir que al disminuir el tamaño de partícula de madera la resistencia al impacto aumenta. En la **Tabla 3.30**, se puede observar todos los resultados promedios encontrados a partir del ensayo de impacto Charpy, obteniéndose un rango de resistencia al impacto de 2,12 – 3,61 kJ/m<sup>2</sup> para el material compuesto.

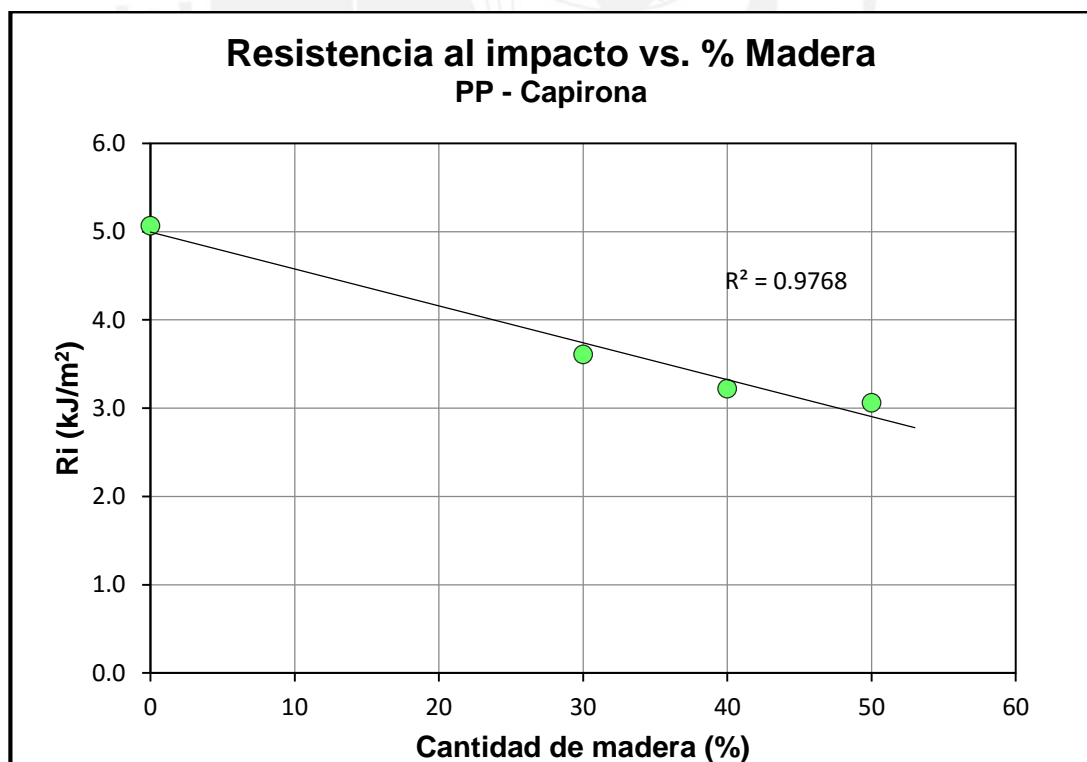
Finalmente, el material compuesto con mejor resistencia al impacto es el de proporción 70%PPR y 30%MC para un tamaño MR3 ( $\leq 1,9$  mm), cuyo valor es 3,61 kJ/m<sup>2</sup> y es 28,8% menor respecto al polipropileno reciclado puro moldeado bajo las mismas condiciones descritas,



**Figura 3.38.** Resistencia al impacto vs. %cantidad de madera capirona tamaño MR1 ( $\leq 5,15$  mm): se observa que la resistencia disminuye al aumentar la cantidad de madera.



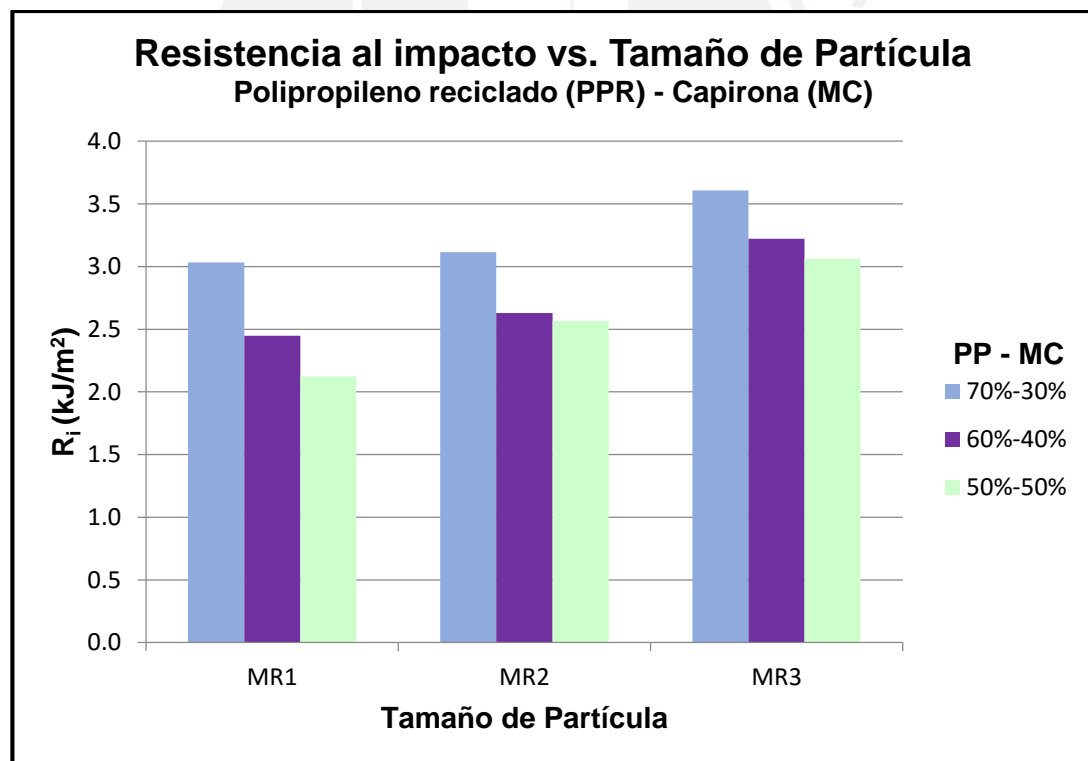
**Figura 3.39.** Resistencia al impacto vs. %cantidad de madera capirona tamaño MR2 ( $\leq 3,33$  mm): la resistencia disminuye al aumentar la cantidad de madera.



**Figura 3.40.** Resistencia al impacto vs. %cantidad de madera capirona tamaño MR3 ( $\leq 1,9$  mm): se observa que la resistencia disminuye al aumentar la cantidad de madera.

**Tabla 3.30** Resultados de la resistencia al impacto del CPM

Mezcla	$R_i$ PROM (kJ/m <sup>2</sup> )
100%PP	5,07
70%PP-30%MR1	3,03
70%PP-30%MR2	3,11
70%PP-30%MR3	3,61
60%PP-40%MR1	2,45
60%PP-40%MR2	2,63
60%PP-40%MR3	3,22
50%PP-50%MR1	2,12
50%PP-50%MR2	2,57
50%PP-50%MR3	3,06



**Figura 3.41.** Resistencia al impacto vs. Tamaño de partícula de capirona (MR1  $\leq 5,15$  mm, MR2  $\leq 3,33$  mm y MR3  $\leq 1,90$  mm). La resistencia al impacto se incrementa conforme se disminuye el tamaño de partícula y disminuye al aumentar la cantidad de madera.

### 3.4.4 Ensayo de densidad

La densidad es una de las propiedades fundamentales de los termoplásticos, debido a que permite identificar a un material y también para seguir cambios físicos en un ensayo (véase **Tabla 3.31**). Las variaciones de la densidad pueden deberse a cambios de cristalinidad, pérdida de plasticidad, absorción de solvente, etc. (Guajardo y col.).

Por tal motivo, para conocer la densidad del PPR, se obtuvieron muestras de las probetas de impacto de PPR fabricados con el mismo procedimiento que los materiales compuestos. Así, se encuentra que el PPR posee una densidad de  $0,89 \pm 0,014 \text{ g/cm}^3$ , valor que disminuye en un 2,2% respecto al PP-virgen ( $0,91 \text{ g/cm}^3$ ), lo que significa que el polímero ha sufrido una degradación después del conformado

El procesamiento repetido produce una degradación de las moléculas en algunas poliolefinas, lo que se refleja en una disminución de la densidad y, por ende, una menor cristalinidad (Guajardo y col.).

**Tabla 3.31** La influencia de la densidad en otras propiedades

Propiedad	Disminución de la densidad
Módulo elástico	disminuye mucho
Elongación a la rotura	disminuye mucho
Temperatura de fusión	disminuye
Temperatura máxima de uso	disminuye
Resistencia al impacto	disminuye
Fluidez	aumenta poco

**Nota.** Fuente: Adaptado de Guajardo y col.

Los resultados adquiridos a partir del ensayo de densidad del material compuesto muestran poca dispersión, tal y como se presenta para la partícula MR1 en la **Figura 3.42**; no obstante, se ha realizado los gráficos considerando los valores promedios obtenidos, al variar el contenido (% en volumen) y tamaño de partícula de capirona, para un mínimo de 12 valores y máximo de 20 por cada mezcla.

Cabe resaltar que para el cálculo de la cantidad de materia prima a utilizar en la fabricación del material compuesto se ha utilizado el valor de la densidad del PP-virgen; ya que, el valor de la densidad del PPR no se conocía, pues aún no se determinaba los parámetros del proceso de fabricación. Por tanto, se seguirá considerando dicha densidad para calcular la densidad teórica del material compuesto y permitir la comparación con la densidad experimental del compuesto.

La densidad teórica (en volumen) se encuentra con la regla de las mezclas de materiales compuestos y ésta se define mediante la **Ecuación 3.2**.

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

donde,

$\rho_{CPM}$  = Densidad del compuesto de plástico y madera

$\rho_{MC}$  = Densidad de la madera capirona = 0,736g/cm<sup>3</sup>

$f_{MC}$  = Fracción volumétrica de las partículas de madera capirona

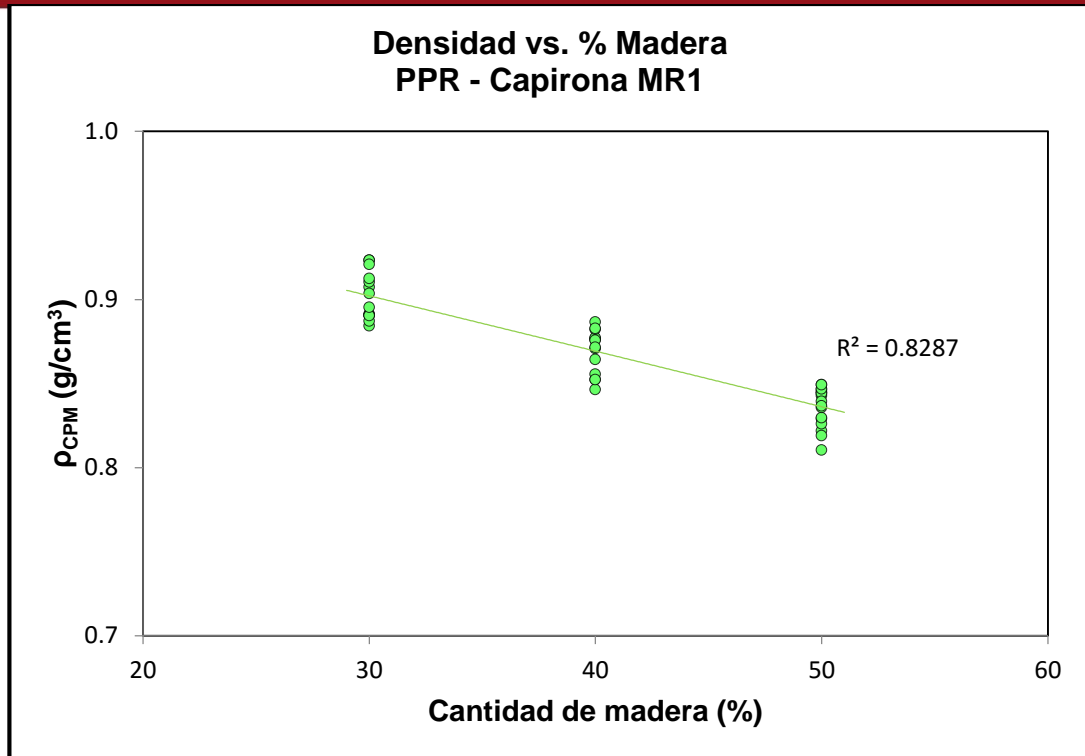
$\rho_{PP}$  = Densidad del polipropileno virgen = 0,91g/cm<sup>3</sup>

$f_{PP}$  = Fracción volumétrica de la matriz (PP)

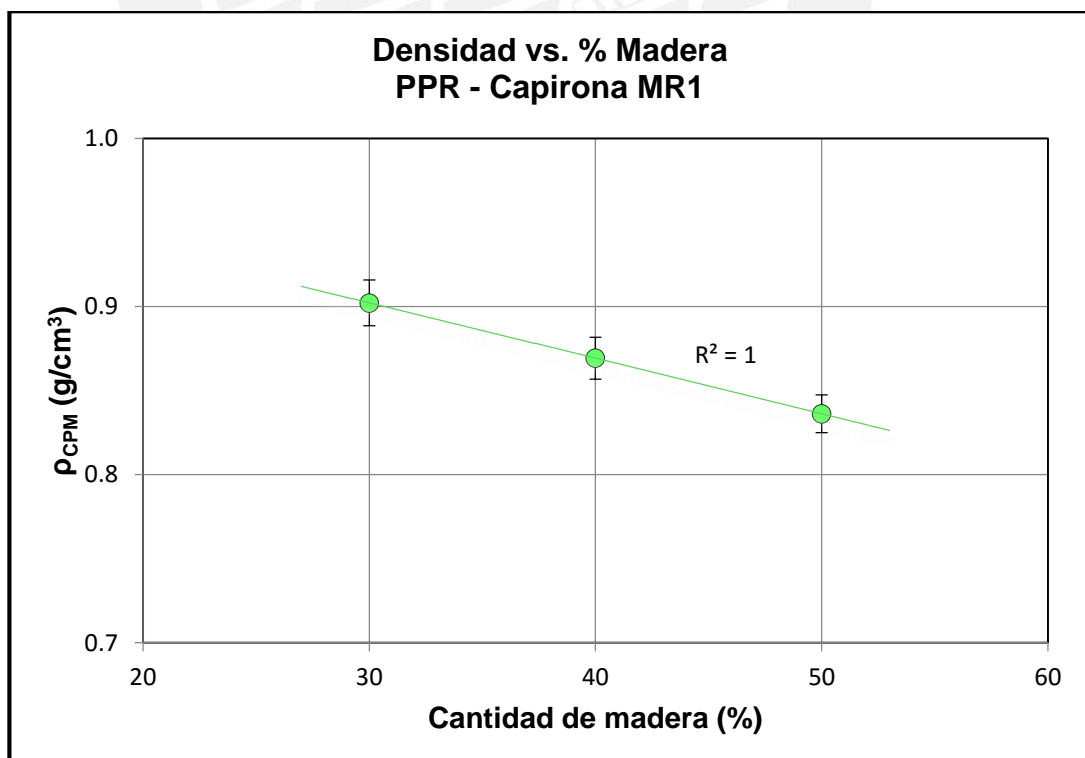
De la ecuación presentada, se puede determinar que, a mayor cantidad de madera, la densidad del compuesto será menor y esto se verifica con los resultados obtenidos en la **Figura 3.43**.

Los resultados de densidad teórica para el compuesto se presenta en la en la **Tabla 3.32**. De los cuales se puede apreciar que el valor de densidad encontrado experimentalmente es mayor al teórico. De acuerdo a Hillig (2002), este suceso se debe a la compactación de la madera en el momento del prensado del material compuesto. Por tanto, para el material compuesto de 70%PPR y 30%MC, la densidad encontrada en el ensayo es mayor en respecto al teórico.

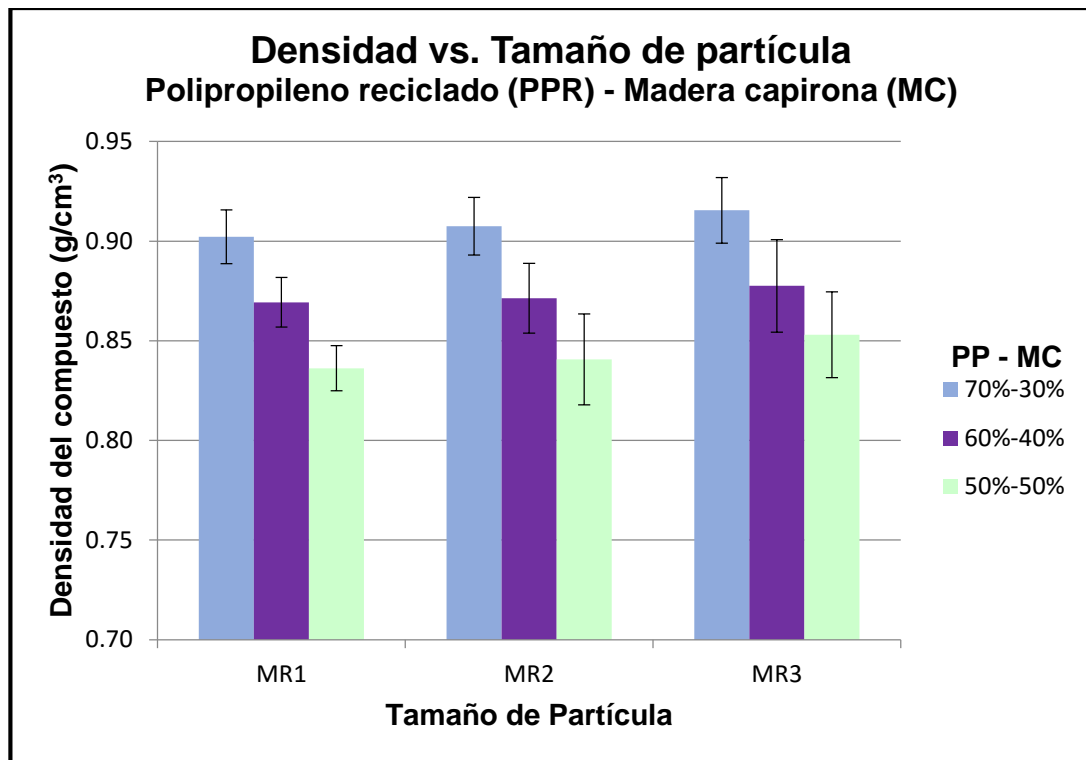
La diferencia de resultados también podría deberse a la falta de homogeneidad en la muestra, en el cual la distribución de las partículas de madera es al azar y esto tiene lógica porque no se utiliza un proceso de mezclado mecánico por lo que una muestra pudo haber contenido mayor cantidad de PPR y por tanto los valores teóricos calculados mediante la regla de las mezclas serían otros.



**Figura 3.42.** Densidad vs. %Cantidad de madera capirona tamaño MR1: Se observan la dispersión de valores obtenidos en el ensayo y la tendencia de estos.



**Figura 3.43.** Densidad vs. %Cantidad de madera capirona tamaño MR1



**Figura 3.44.** Densidad vs. Tamaño de partícula capirona (MR1  $\leq 5,15$  mm, MR2  $\leq 3,33$  mm y MR3  $\leq 1,90$  mm). Se muestran las barras de error correspondientes a la desviación estándar.

**Tabla 3.32** Resultados de densidad promedio para los diversos contenidos y tamaños de partículas de MC

Mezcla	$\rho_{\text{CPM TEÓRICO}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{\text{CPM EXPERIMENTAL}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	Desviación estándar	CV (%)
100%PP	0,91	0,891	0,014	1,54
100%MC	0,736	0,736	0,015	2,04
70%PP-30%MR1		0,902	0,014	1,50
70%PP-30%MR2	0,858	0,908	0,015	1,61
70%PP-30%MR3		0,910	0,016	1,80
60%PP-40%MR1		0,869	0,012	1,44
60%PP-40%MR2	0,840	0,871	0,018	2,01
60%PP-40%MR3		0,878	0,023	2,65

Mezcla	$\rho_{\text{CPM TEÓRICO}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{\text{CPM EXPERIMENTAL}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	Desviación estándar	CV (%)
50%PP-50%MR1		0,836	0,011	1,35
50%PP-50%MR2	0,823	0,841	0,023	2,72
50%PP-50%MR3		0,853	0,021	2,52

### 3.4.5 Ensayo de absorción de agua

Como se conoce, el polipropileno es considerado un material hidrofóbico y esto se puede corroborar en la cantidad de agua absorbida (Deng, 2010). No obstante, inclusive con 0,2% de absorción de agua, los polímeros pueden sufrir una degradación hidrolítica (reacción química que ocurre a altas temperaturas en presencia de agua) durante el proceso de fundido, consiguiéndose una pérdida significativa de propiedades mecánicas y físicas (Mat-Shayuti, 2013).

El resultado de absorción de agua obtenido en las muestras de PPR, las cuales siguieron el proceso de fabricación del CPM, es igual a  $0,063 \pm 0,012$  %. Este valor es similar al obtenido en un estudio realizado por Mat-Shayuti y col. (2013), el cual encuentra que el PP absorbe un 0,06% de agua a 23°C.

Los resultados del ensayo de absorción de agua realizado para el material compuesto presentan una ligera dispersión, lo cual ha sido influenciado porque el compuesto fabricado no es homogéneo (véase **Figura 3.45**). La variación también depende del tamaño de partícula, la especie de la madera y los extractivos (Ashori y col. 2010). Por ello, se ha tomado el promedio para realizar los gráficos de absorción de agua para cada proporción de madera utilizada en la preparación del CPM y al variar el tamaño de partícula. Por tanto, se considera un mínimo de 10 y un máximo de 20 valores para cada mezcla.

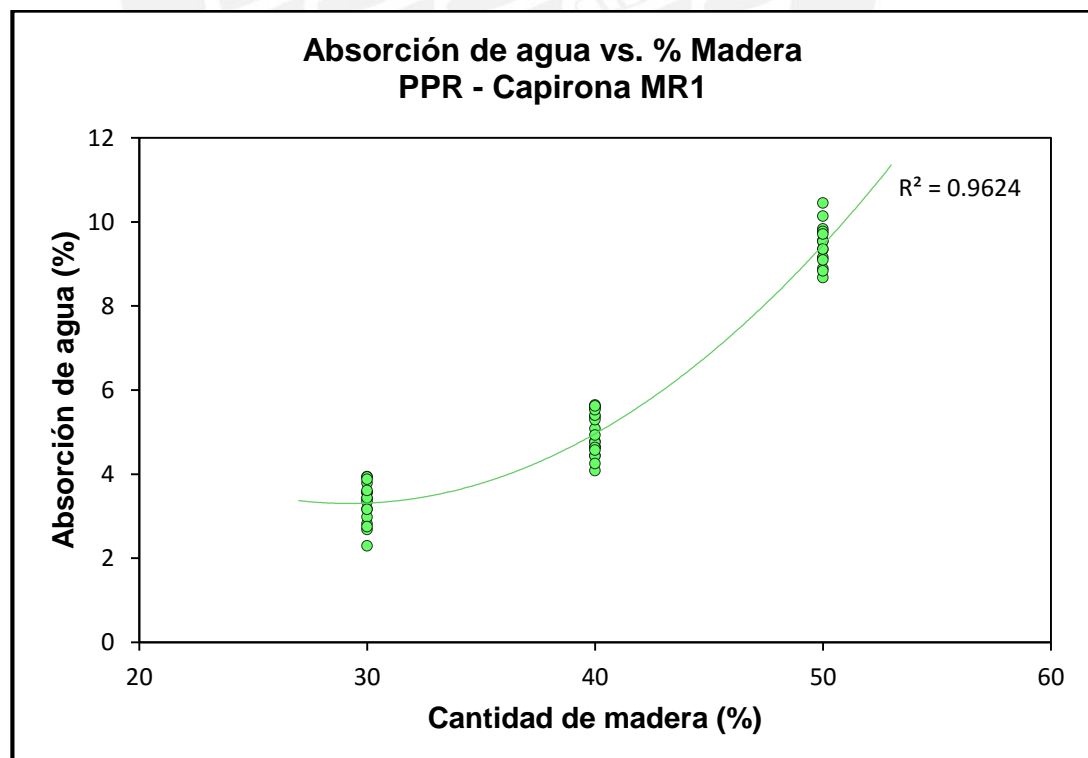
En las **Figuras 3.46** se observa que conforme se incrementa el contenido de partículas de madera capirona (% en volumen) en el material compuesto también aumenta el contenido de absorción de agua ( $A_{\text{CPM}}\%$ ). Éste resultado es lógico; ya que, como se mencionó anteriormente, la madera es un material higroscópico, por lo que tiende a absorber agua. En cambio, la matriz polimérica no absorbe alguna humedad (Bledzki y col. 2005) o en todo caso es despreciable. Además de ello, a

más cantidad de madera el compuesto es poroso y contiene más espacios vacíos, entonces hay más agua absorbida (Kumari 2008).

Por otro lado, al variar el tamaño de partícula de madera a una más fina (de MR1 a MR3) disminuye el contenido de absorción de agua, tal y como se puede observar en la **Figura 3.47**. Ese hecho es debido a que el agua es absorbida por la partícula que no ha sido unida con la resina y ésta adherencia disminuye con el incremento de tamaño de madera (Kumari 2008).

En la **Tabla 3.33**, se presenta un resumen de los resultados promedios obtenidos del ensayo de absorción de agua. Por tanto, conforme lo analizado anteriormente, para las partículas MR1 el porcentaje de absorción de agua aumenta desde 3,311% hasta 9,451% para un 30% y 50% de contenido de MC respectivamente.

Por otra parte, la mayor cantidad de absorción de agua se obtiene para el 50% de MC y este valor decrece desde 9,451% hasta 7,611% al disminuir el tamaño de partícula de MR1 ( $\leq 5,15\text{mm}$ ) a MR3 ( $\leq 1,90\text{mm}$ ) respectivamente. Si se compara estos valores máximos con la cantidad de  $\%A_{MC}$  para la capirona (42.75%), se puede observar que el material compuesto absorbe menos agua que la madera en un 77,9%, lo cual es una ventaja para el CPM (véase **Figura 3.48**).



**Figura 3.45.** Absorción de agua vs. %Cantidad de madera capirona tamaño MR1.

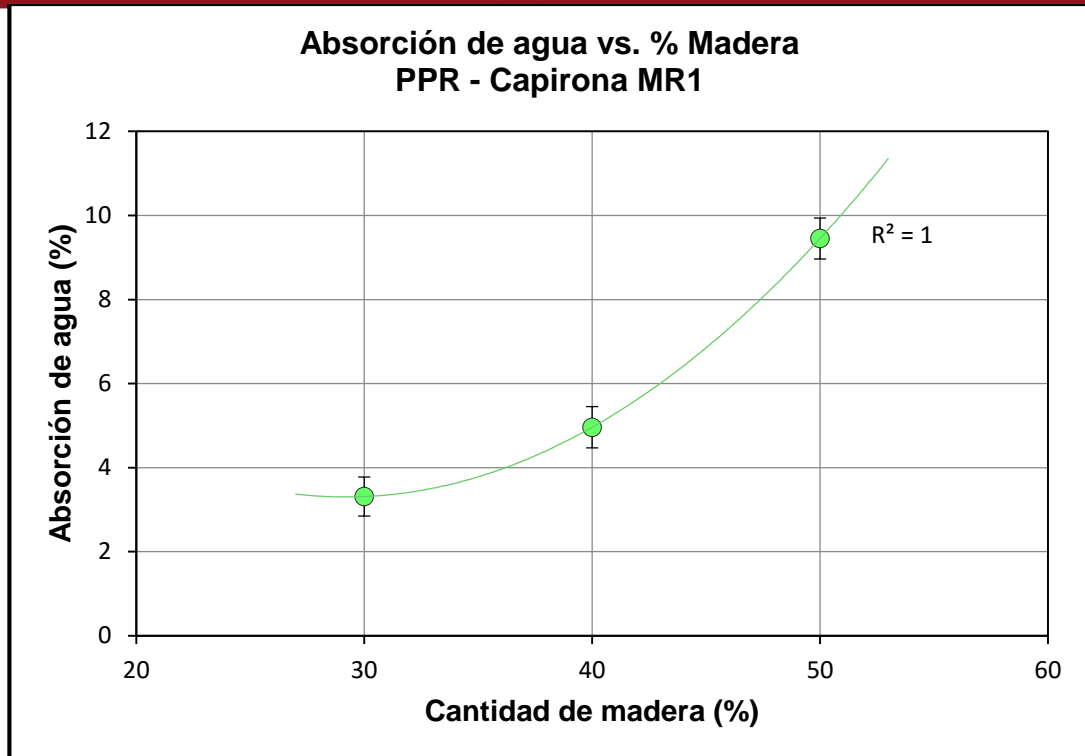


Figura 3.46. Absorción de agua vs. %Cantidad de madera capirona tamaño MR1

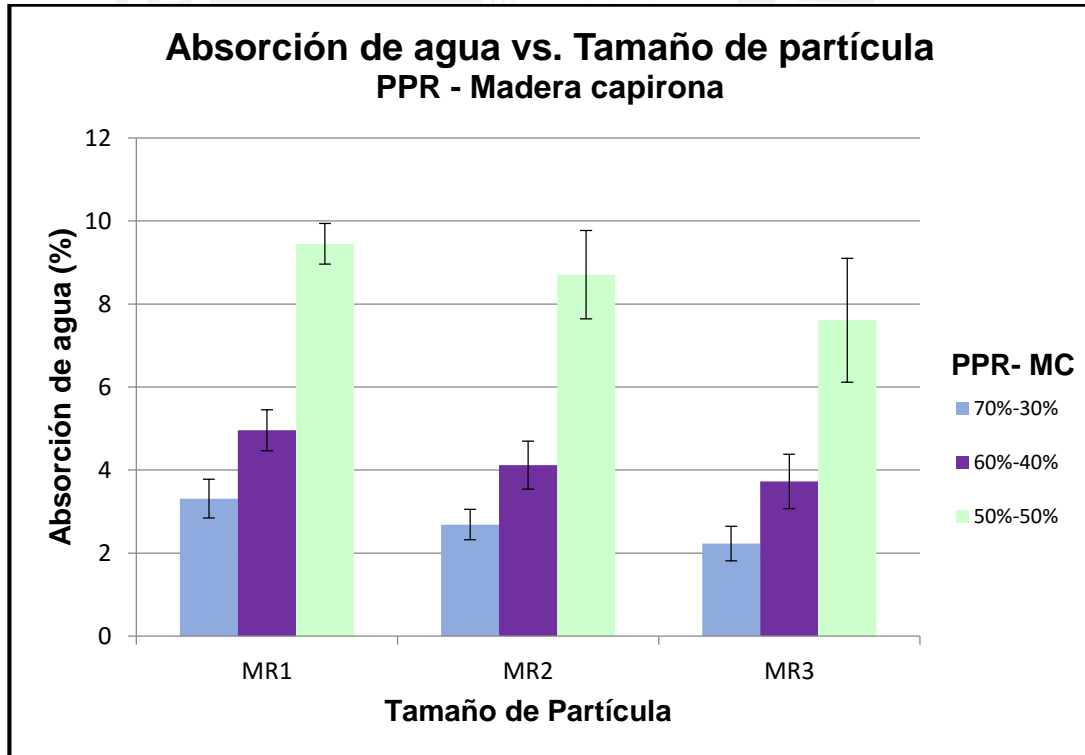


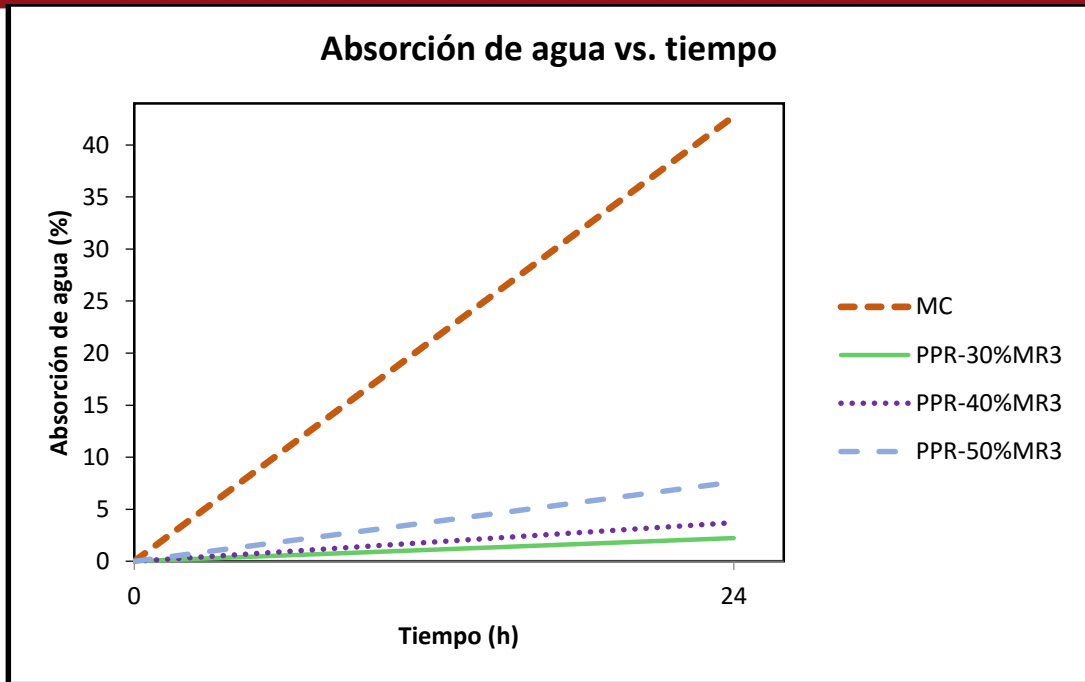
Figura 3.47. Absorción de agua vs. Tamaño de partícula capirona, se muestran las barras de error correspondientes a la desviación estándar

**Tabla 3.33** Resultados de absorción de agua promedio (%A<sub>CPM PROM</sub>) para los diversos contenidos y tamaños de partículas de MC

Mezclas	A <sub>CPM PROM</sub> (%)	Desviación estándar	CV (%)
PPR	0,063	0,012	18,71
MC	42,75	8,348	19,53
PPR-30%MR1	3,311	0,467	14,10
PPR-40%MR1	4,960	0,493	9,94
PPR-50%MR1	9,451	0,489	5,17
PPR-30%MR2	2,687	0,368	13,69
PPR-40%MR2	4,120	0,579	14,05
PPR-50%MR2	8,705	1,065	12,23
PPR-30%MR3	2,230	0,418	18,76
PPR-40%MR3	3,727	0,656	17,59
PPR-50%MR3	7,611	1,492	19,61

La disminución de %A<sub>PROM</sub> en el CPM respecto a la madera se debe a que el polímero está adherido a la madera, brindándole parte de la característica hidrofóbica evitando que el compuesto absorba cantidades elevadas de agua como lo hace la madera. De esta manera, la menor absorción de agua del compuesto se encuentra para un tamaño más fino de capirona (MR3) y un menor porcentaje de madera (30%) el cual es 2,230%.

Por otro lado, un reporte de investigación menciona que en un compuesto existen 3 regiones donde el agua puede ser adsorbida: las paredes celulares, el lumen y los espacios existentes en la débil adhesión entre la madera y plástico (citado en Ashori, 2010). Debido a que el valor de agua contenida en el compuesto es mucho menor que la madera se puede concluir que la adhesión entre plástico y madera ha sido favorable, principalmente para el caso de PPR-30%MR3 y PPR-30%MR2.



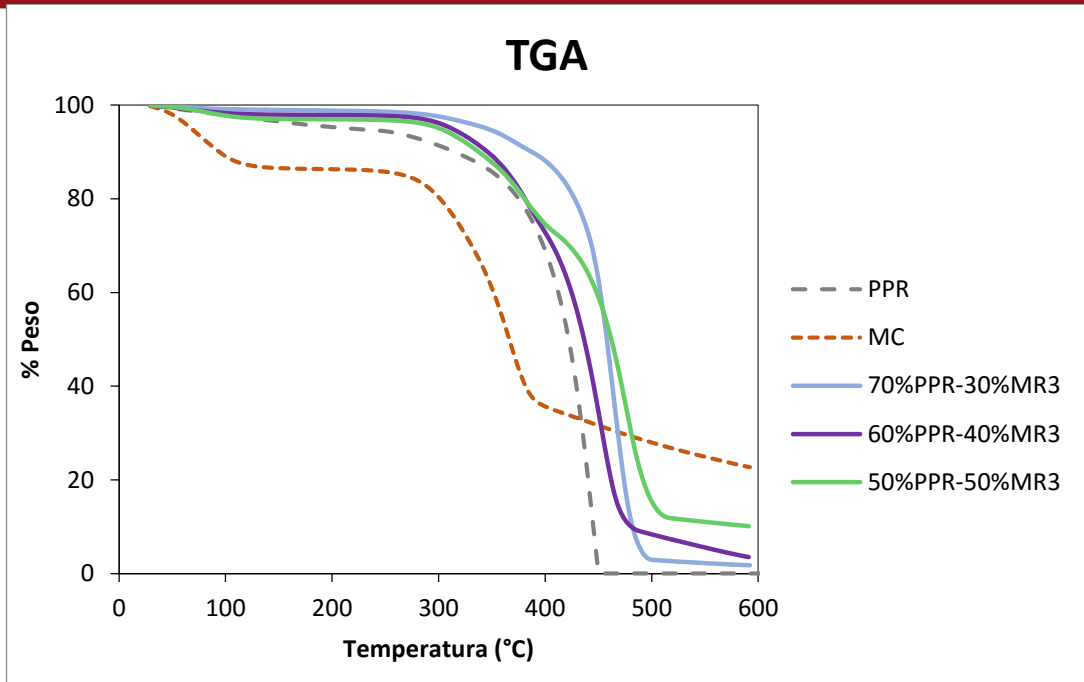
**Figura 3.48.** Absorción de agua vs. Tiempo

Cabe resaltar que es importante investigar el comportamiento de absorción de agua del compuesto para conocer la durabilidad de éste bajo condiciones ambientales.

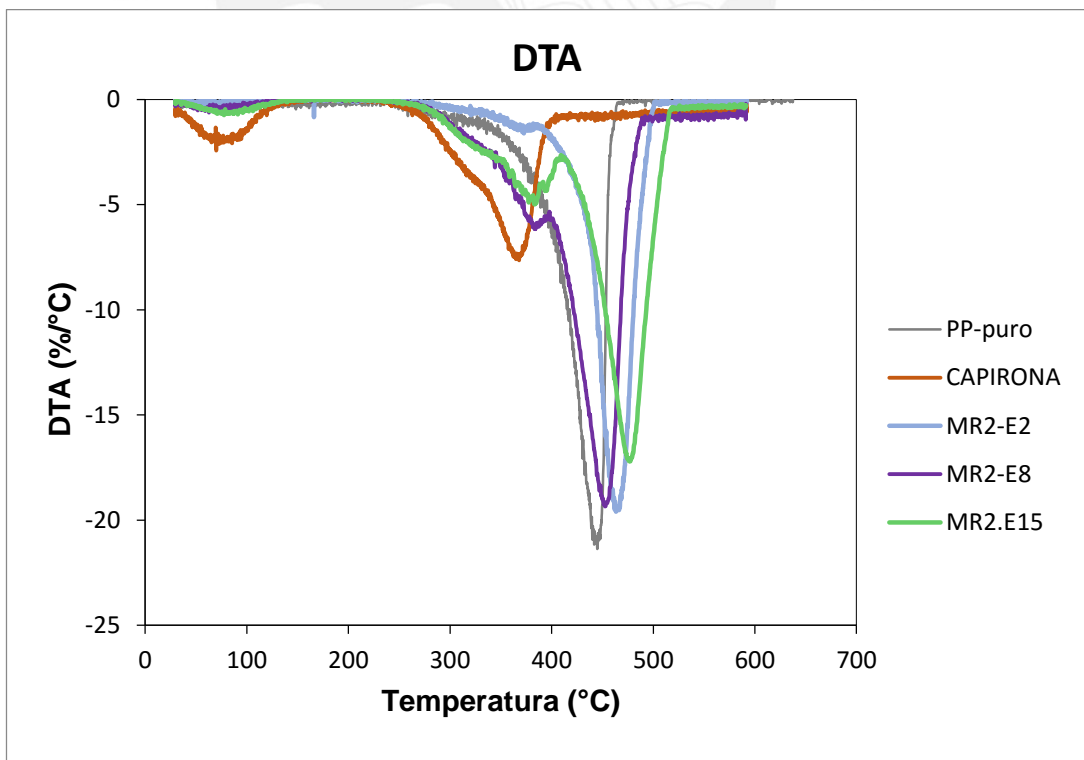
Por tanto, las tendencias obtenidas se pueden comparar con diversas investigaciones; tal es el caso estudiado por Flores (2013), el cual encontró un contenido de absorción de agua de 10,904% para un compuesto fabricado por moldeo por compresión con 60% de PP y 40% de madera pino radiata con tamaño  $\leq 5,15\text{mm}$ . Así, se puede notar que el CPM con capirona absorbe menos agua que con el uso de pino y eso se debe principalmente a las características de la especie.

### 3.4.6 Análisis térmico

De los termogramas obtenidos mediante el ensayo de TGA (véase **Figura 3.49** y **3.50**), se puede notar que conforme se aumenta la cantidad de madera al compuesto existe dos etapas de degradación. La primera etapa es debido a la presencia de la madera y la segunda a la del plástico. En la **Tabla 3.34**, se puede observar los valores obtenidos a partir del ensayo de TGA, en el cual se observa que el material compuesto presenta mejor estabilidad térmica que cada material puro por separado.



**Figura 3.49.** Curvas termogravimétricas de los materiales puros y de los compuestos

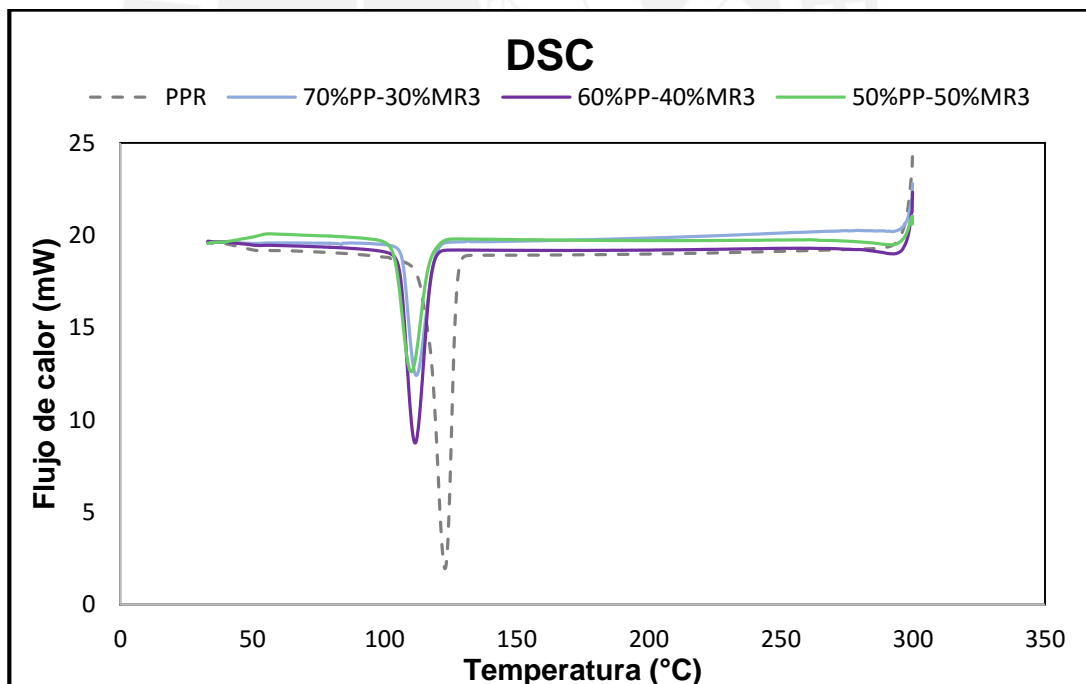


**Figura 3.50.** Termogramas diferenciales de los materiales puros y de los compuestos

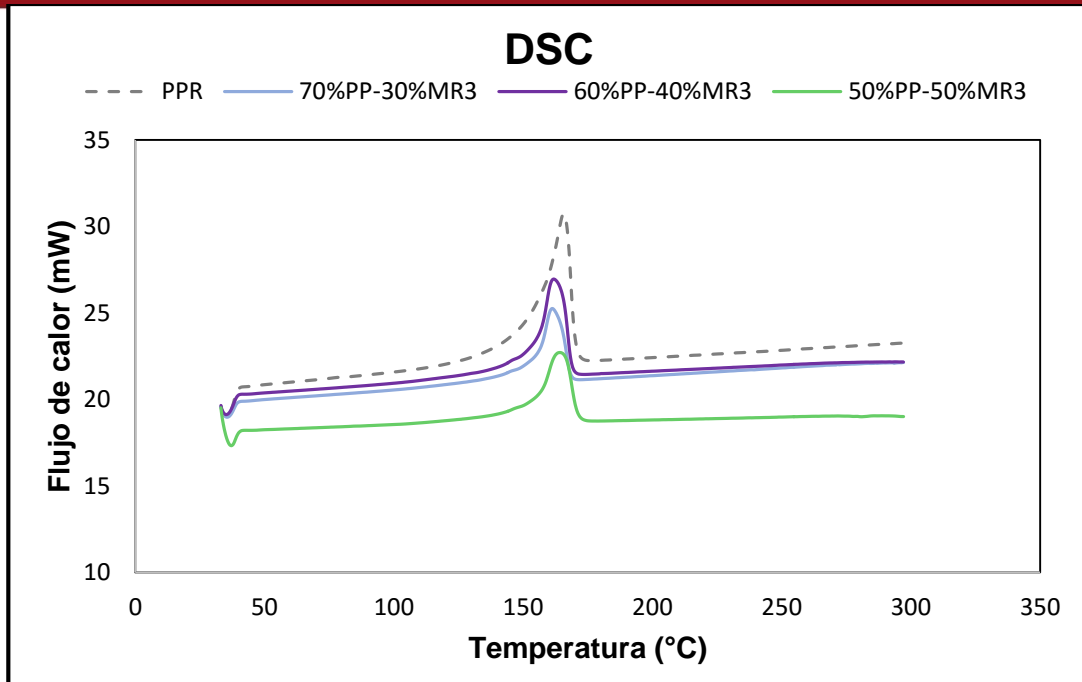
**Tabla 3.34** Resultados del análisis de TGA para el material compuesto

Mezcla	Rango 1 (°C)	Tm <sub>1</sub> (°C)	Rango 2 (°C)	Tm <sub>2</sub> (°C)	%Cenizas
PPR	250 - 450	444,91	-	-	0,0
MC	25 - 125	70	240 - 600	368	22,7
70%PPR-30%MR3	254 - 500	463,4	-	-	1,8
60%PPR-40%MR3	246 - 402	386,4	402 - 600	452,3	3,5
50%PPR-50%MR3	260 - 410	383,2	410 - 600	477,5	10,1

El ensayo de calorimetría de barrido diferencial también fue realizado a los materiales compuestos. En la **Figura 3.51** se puede observar la temperatura de cristalización ( $T_c$ ) del PPR-puro y de los diferentes compuestos fabricados con tamaño de partícula MR3 y diversas proporciones en volumen de capirona (desde 30% hasta 50%). De esto se puede observar que la  $T_c$  del PPR disminuye entre a 9,7 y 7,7 °C al aumentar la cantidad de madera PPR. De manera similar, el pico de fusión ( $T_f$ ) del PPR decrece entre 3,4 y 6,3 °C al aumentar la cantidad de madera (véase **Figura 3.52**)



**Figura 3.51.** Diagrama DSC del PPR-enfriamiento



**Figura 3.52.** Diagrama DSC del PPR-segundo calentamiento

Para determinar el grado de cristalinidad, se utiliza la **Ecuación 3.3**. De los resultados presentados en la **Tabla 3.35** se puede notar que, al incrementar la cantidad de madera, disminuye el grado de cristalinidad hasta 51,12%.

$$X_c = \frac{\Delta h_m}{\Delta h_m^0} \times \frac{1}{w_f} \times 100\% \quad (3.3)$$

Donde:

$\Delta h_m$  = Calor de fusión

$\Delta h_m^0$  = Calor de fusión de un polipropileno completamente cristalino = 209 J/g (Butylina y col. 2011)

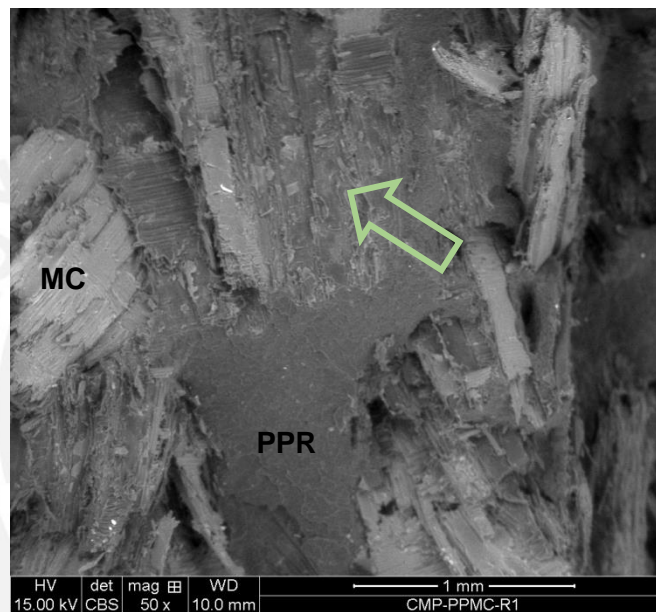
$w_f$  = Fracción en peso del PP en el compuesto


**Tabla 3.35** Resultados del análisis de DSC para el material compuesto

Mezclas	Enfriamiento		2° calentamiento		
	T <sub>c</sub> (°C)	Δh <sub>c</sub> (J/g)	T <sub>f</sub> (°C)	Δh <sub>f</sub> (J/g)	X <sub>c</sub> (%)
PPR	119,80	91,92	167,50	93,60	44,78
70%PPR-30%MR3	112,09	42,03	161,22	33,98	21,89
60%PPR-40%MR3	111,49	42,63	161,86	35,77	26,34
50%PPR-50%MR3	110,07	29,29	164,09	26,50	22,94

### 3.5 Análisis morfológico del material compuesto

De acuerdo a los resultados analizados, las mejores propiedades mecánicas y físicas presenta el material compuesto fabricado con 70% PP- 30%MC con partículas de madera MR3 ( $\leq 1,90$  mm). Mediante las imágenes del SEM, se pudo corroborar estos resultados; ya que, la buena adhesión entre la matriz y refuerzo influye en sus propiedades. Por tanto, en la **Figura 3.53**, se puede notar la buena adherencia en la intercara (límite de partícula de capirona y PP). Además, se observa la dispersión del material lignocelulósico en el PP y cómo el termoplástico ha embebido las partículas de madera (véase **Figura 3.54**).



**Figura 3.53.** Característica morfológica del CPM con proporción 70%PP-30%MC y partícula de madera  $\leq 1,90$  mm (MR3) a una  $T_w$  de  $190^\circ\text{C}$  y un  $t_w$  de 50 min.  : Partículas de madera embebidas por el plástico que presenta una buena adhesión.



**Figura 3.54.** Imagen a 20X de una fractura de tracción del CPM con proporción 70%PP-30%MC MR3 a una  $T_w$  de 190°C y un  $t_w$  de 50 min (mezcla medianamente homogénea).



## CONCLUSIONES

1. Se ha estudiado el proceso de sinterizado de los materiales compuestos fabricados a partir de polipropileno reciclado y partículas de madera capirona mediante el moldeo por compresión; determinándose que, para una misma proporción y tamaño de partícula de madera, las propiedades mecánicas en geometría de flexión se incrementan a mayor temperatura de trabajo y, de manera similar, también se incrementa con el tiempo hasta un máximo para luego disminuir con tiempos excesivos.
2. Para el material compuesto de 70% de polipropileno reciclado y 30% de partículas de capirona ( $\leq 3,33$  mm), las mejores propiedades (34,9 MPa de resistencia a la flexión y un módulo elástico en flexión de 2085,7 MPa) se obtienen a la temperatura de trabajo ( $T_w$ ) igual a  $190 \pm 3$  °C con un tiempo de calentamiento ( $t_w$ ) de  $50 \pm 2$  min, siendo éstas las condiciones que garantizan un proceso de sinterizado óptimo. No obstante, en la perspectiva de disminuir el tiempo de trabajo con el consecuente ahorro de energía, es posible realizar pequeños incrementos de la temperatura de trabajo (10 °C), resultando además una mejora en sus propiedades.
3. De acuerdo a un análisis mediante el uso del SEM, se puede concluir que existe una buena adherencia entre la partícula de capirona de tamaños menores que 3,33 mm (MR2) y polipropileno reciclado (PPR) en una proporción de 30% y 70% respectivamente, para las siguientes condiciones de moldeo:  $T_w = 190$  °C,  $t_w = 40$  a 50 min, 70 bar de presión y 10 min de tiempo de prensado y enfriamiento.
4. La resistencia a la flexión ( $R_b$ ) y el módulo elástico (E) de los materiales compuestos obtenidos a las temperaturas de trabajo de 190, 180 y 175 °C para todos los tiempos estudiados son mayores a los valores correspondientes de la madera capirona en la dirección transversal ( $R_b = 7,59$  MPa y  $E = 1259$  MPa).
5. Los valores promedios de las propiedades obtenidas a partir de la caracterización de la madera capirona son:  $0,736 \pm 0,015$  g/cm<sup>3</sup> de densidad,  $12,77 \pm 0,23$  % de humedad,  $42,75 \pm 8,35$  % de absorción de agua, y una temperatura de degradación de 367,48 °C. Según estos resultados la madera capirona es de alta densidad y elevada estabilidad térmica.

6. El polipropileno reciclado tiene un índice de fluidez promedio de 2,7 g/10min (3,85% mayor al material virgen), una temperatura de degradación de 444,91 °C (2,25% menor que el virgen) y una cristalinidad de 44,78% (17,18% menor que el virgen), lo que indica que el PPR ha sufrido una degradación térmica debido al proceso de conformado de las tapas.
7. Para las condiciones de moldeo: temperatura de trabajo igual a 190 °C y tiempo de 50 min, la variación del tamaño de partícula no influye significativamente en las propiedades mecánicas en flexión del compuesto, mientras que la proporción en volumen de la madera en el compuesto sí produce una disminución de la resistencia y el módulo elástico en flexión. Las mejores propiedades se presentan en el compuesto con 30% en volumen de capirona y tamaño de partícula  $\leq 1,90$  mm (MR3), el cual posee un módulo elástico en flexión ( $E = 2100,64 \pm 38,66$  MPa) que es 20,7% mayor que el polipropileno reciclado puro (PPR) moldeado con los mismos parámetros, mientras que la resistencia a la flexión ( $R_b = 34,65 \pm 0,98$  MPa) disminuye en 25,3% respecto al PPR.
8. Las propiedades físicas de los materiales compuestos adecuadamente sinterizados son influenciadas por la cantidad (en volumen) y tamaño de partícula de la madera. Por tanto, conforme se aumenta la proporción de madera disminuye la densidad y aumenta la absorción de agua. Caso contrario ocurre al disminuir el tamaño de partícula (más finas); ya que, aumenta la densidad y disminuye la cantidad de absorción de agua.
9. En conclusión, el material compuesto sinterizado de madera y plástico presenta buenas propiedades de rigidez, es liviano y posee mayor estabilidad térmica que el polipropileno reciclado puro. Con respecto a la dirección transversal de la madera capirona, el material compuesto presenta mayor resistencia y módulo en flexión, menor absorción de agua y mayor estabilidad térmica.

## BIBLIOGRAFÍA

ACEVEDO y José SOLÍS

2010 “Desarrollo de un material compuesto a base de residuos de madera Capirona (*Calycophyllum spruceanum*) y polietileno”. *Informe Científico Tecnológico 2010*. Lima, pp. 43-48.

ALMAADEED, Mariam A. y otros

2012 “Date palm wood flour/glass fibre reinforced hybrid composites of recycled polypropylene: Mechanical and thermal properties”. *Materials and Design*. Volumen 42, pp.289–294

ALMGRE, K.; E. GAMSTEDT

2007 Natural fibre composites – whitin special emphasis on effects of the interface between cellulosic fibres and polymers

AMAZONIA

2004 “Pau mulato da vársea: *Calycophyllum spruceanum* (Benth.) Hook. F. ex K. Schum”. *Informativo Técnico Rede de Sementes da Amazonia*. Número 6.

AMAZONÍA 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.7. Consulta: 28 de diciembre de 2015.

[http://www.revista-mm.com/ediciones/rev79/forestal\\_wwf79.pdf](http://www.revista-mm.com/ediciones/rev79/forestal_wwf79.pdf)

AMERICAN WOOD PRODUCTS S.A.C (AWP)

s/f Catálogo de especies. Consulta: 28 de diciembre de 2015.

<http://www.americanwood-products.com/madera.pdf>

ANSELL, M.

2003 “Fatigue wood and wood panel products”. Publicado en Bryan Harris (ed.). *Fatigue in Composites*. Cambridge-Inglaterra: Editorial Woodhead Publishing Limited, pp. 339-343.

ARBOCENTER

*Descrição: Sementes de Pau Mulato / Pau-Mulato-da-Várzea.* Consulta: 28 de diciembre de 2015.

<http://www.compresementes.com.br/loja/sementes-nativas/sementes-de-pau-mulato.html>

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

2013 *Engineering Materials 2: An Introduction to Microstructures and Processing.* Cuarta edición. Oxford: Elsevier.

Arne SCHIRP, Manuel MANNHEIM y Burkhard PLINKE

2014 "Influence of refiner fibre quality and fibre modification treatments on properties of injection-moulded beech wood-plastic composites". *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.* Volumen 61, pp. 245-257.

Fraunhofer-Institute for Wood Research (Wilhelm-Klauditz-Institut WKI), Bienroder Weg 54E, 38108 Braunschweig, Germany

ASHORI, Alireza. y Amir NOURBAKHS

2010 "Reinforced polypropylene composites: effects of chemical compositions and particle size" *Bioresource technology.* Volumen 101, número 7, pp. 2515-2519.

BALOW, M.

2003 "Global Trends for Polypropylene". Publicado en Karian H.G. (ed.). *Handbook of polypropylene and polypropylene composites.* Nueva York: Editorial Marcel Dekker.

BALUARTE, Juan y Gustav NEBEL

2002 "Incremento diamétrico de guarea macrophylla vahl. y calycophyllum spruceanum (bentham) hooker f. ex. schumann en bosques inundables de la amazonía peruana". *Folia Amazónica.* Iquitos, volumen 13, número 1-2, pp. 109-120.

BAONZA, M.; A. GUTIÉRREZ y J. GRAU

2001 "Variación de la densidad, la humedad, el duramen y la corteza con la altura en el tronco de pino laricio". *Actas del III Congreso Forestal Español.* Granada, tomo 5, pp. 627-631. Consulta: 07 de octubre de 2015.

<http://secforestales.org/publicaciones/index.php/congresos/article/download/6420/6347>.

BLEDZKI, A. y otros

2005 "A comparison of compounding processes and wood type for wood fibre-PP composites". *Composites Part A*. Volumen 36, número 6, pp. 789-797.

BORREGA, Marc y Petri KÄRENLAMPI

2008 "Mechanical behavior of heat-treated spruce (*Picea abies*) Wood at constant moisture content and ambient humidity". *Holz Roh Werkst*. Volumen 66, pp. 63-69.

BOTERO, E. y otros

2015 "Stress-strain behavior of a silty soil reinforced with polyethylene terephthalate (PET)". *Geotextiles and Geomembranes*. Volumen 43, número 4, pp. 363-369.

BUTYLINA, Stevlana, Marko HYVÄRINEN y Timo KÄRKI

2012 "A study of surface changes of wood-polypropylene composites as the result of exterior weathering". *Polymer Degradation and Stability*. Volumen 97, número 3, pp. 337-345.

CALVO, Carlos y otros

2007 "Propiedades de hinchamiento y contracción en la madera de *Eucalyptus grandis* de argentina". *Revista Madeira Arquitetura & Engenharia*. Número 20, año 8. Consulta: 07 de octubre de 2015.

CANADIAN WOOD COUNCIL

2004 "Managing Moisture and Wood". *Wood Durability - Building Performance Bulletin*. Consulta: 27 de diciembre de 2015.

[http://cwc.ca/wp-content/uploads/publications-BP6\\_ManagingMoistureAndWood.pdf](http://cwc.ca/wp-content/uploads/publications-BP6_ManagingMoistureAndWood.pdf)

CARNEIRO, O; A. SILVA y R. GOMES

2015 "Fused deposition modeling with polypropylene". *Materials & Desing*. Volumen 83, pp. 768-776.

CARRASCO, F y otros

1993 6th European. Conference on Composite Materials, France, pp. 483. 12.

CLEMONS, C. y N. STARK

2007 *Use of saltcedar and Utah juniper as fillers in wood-plastic composites*. Res. Pap. FPL RP-641. Madison, Wisconsin: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. pp.17,2007.

CORONEL, E.

1994 *“Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas”*. Santiago Del Estero: Instituto de Tecnología de la Madera. 1ed. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero.

<http://madeira.set.eesc.usp.br/article/download/195/pdf>

Couturier, Guy y José Gonzales

1994 “Insectos plaga de la “capirona”, *Calycophyllum spruceanum* Benth (Rubiaceae), en sistema agroforestal”. *Rev. per. Ent.* Volumen 37, pp.97-99

DAI, D. y M. FAN.

2014 “Wood fibres as reinforcements in natural fibre composites: structure, properties, processing and application”. *Publicado en Natural Fibre Composites*. Editado por Hodzic A. y R. Shanks. 1ra Edición. Woodhead publishing, Reino Unido.

DAO, K.C.

1983 “Rubber phase dispersion in polypropylene”. *Polymer*. Volumen 25, pp. 1527-1533.

DANYADI, L. y otros

2007 “Wood Flour Filled Polypropylene Composites: Interfacial Adhesion and Micromechanical Deformations”. *Publicado en Wiley InterScience, Polymer Engineering and Science*. pp. 1246-1255.

DASARI, A.; S. SARANG y K. MISRA

2004 "Strain rate sensivity of homopolymer polypropylenes and micrometric wollastonite-filled polypropylene composites". *Materials Science and Engineering A368*. Pp. 191-204.

DENG, H.

2010 "The water absorption behaviour of all-polypropylene composites and its effect on mechanical properties". *Composites: Part B*. Volumen 41, pp. 268–275.

Diario El Comercio

2010 *Puno y Arequipa registraron las temperaturas más bajas del año* [Informe meteorológico]. Consulta: 5 de enero de 2016.

<http://elcomercio.pe/peru/lima/puno-arequipa-registraron-temperaturas-mas-bajas-ano-noticia-595523>

DOBREVA, D. y S. NENKOVA

2007 "Morphology and mechanical properties of polypropylene-wood flour composites". *BioResources*. Volumen 1, número 2, pp. 209-219.

E. OLAKANMI y M. STRYDOM

2016 "Critical materials and processing challenges affecting the interface and functional performance of wood polymer composites (WPCs)". *Material Chemistry and Physics*. *Article in press*.

EDER A. y M. CARUS

2013 "Global Trends in Wood-Plastic Composites (WPC)". *Bioplastic MAGAZINE*. Volumen 8, pp. 16-17.

ESCOBAR, Oscar y otros

1993 Fichas técnicas de las maderas en Colombia. Universidad Nacional de Colombia – SENA. Consulta: 5 de enero de 2016.

<http://www.unalmed.edu.co/~lpforest/html/fichastecnicas.html>

ESHELBY, J.

Discussion in paper by Shaler A.J. Seminar on the kinetics of sintering. *Trans AIME* 185:806.

TORRES, Fernando y M. CUBILLAS

2005 Study of the interfacial properties of natural fibre reinforced polyethylene. *Polymer Testing*, 24(6), 694-698.

FAN, Y. y otros

2011 "Microstructure of two polypropylene homopolymers with improved impact properties". *Polymer*. Volumen 52, número 2, pp. 557-563.

FERNANDES B. y A. DOMINGUES

2007 "Caracterização Mecânica de Polipropileno Reciclado para a Indústria Automotiva". *Polímeros: Ciência e Tecnologia*. Volumen 17, número 2, pp. 85-87.

FERNÁNDEZ, A. y otros

2005 "Molecular structure and local dynamic an impact polypropylene copolymers studied by preparative TREF, solid state NMR spectroscopy, and SFM microscopy". *Polymer* 61, pp. 87-98.

FLORES, Félix

2013 *Estudio de materiales compuestos de polipropileno reciclado y pinor ecuperado*. Tesis para optar el título de ingeniero. Lima: PUCP, Facultad de Ciencias e Ingeniería..

FRENKEL, J.

1945 "Viscous flow of crystalline bodies under the action of surface tension". *Journal of Physics*. Volumen 9, pp. 385.

FRIEDRICH, D. y A. LUIBLE

2016 "Supporting the development process for building products by the use of research portfolio analysis: A case study for wood plastics composite materials". *Case Studies in Construction Materials*. Volumen 4, pp. 49-54.

FOREST PRODUCTS LABORATORY (U.S.)

2009 "Moisture content of wood in use". U.S.D.A. *Forest Service research note FPL*. Madison, volumen 226. Consulta: 27 de diciembre de 2015.

<http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplrn/fplrn226.pdf>

FROLLINI, E.; A. LEÃO y L. MATTOSO

2000 "Natural polymers and agrofiber based composites". *Embrapa Instrumentação Agropecuária*, S.Carlos, SP.

GAGO, Javier y otros

2011 "Desarrollo de una extrusora de laboratorio para compuestos poliméricos basado en residuos de fibras naturales y polietileno". *Informe Científico Tecnológico*. Volumen 11, pp. 147-152.

KHAZAEI, J.

2008 "Water absorption Characteristic of three wood varieties". *Cercetări Agronomice în Moldova*, Volumen 134, número 2, pp. 1-12. Consulta: 28 de diciembre de 2015.

[http://www.uaiasi.ro/CERCET\\_AGROMOLD/CA2-08-01.pdf](http://www.uaiasi.ro/CERCET_AGROMOLD/CA2-08-01.pdf)

GRECO, A. Y MAFFEZZOLI, A.

2003 "Polymer melting and polymer powder sintering by thermal analysis". *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. Volumen 72, pp. 1167-1174.

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.

GÓMEZ, Rosario y Francisco FLORES

2014 Ciudades sostenibles y gestión de residuos sólidos. Universidad del Pacífico – Centro de Investigación.

GUAJARDO, Adriana; Laura NAJAR; Susana PRÓSPERI y María MOLINA

s/f "Propiedades de los plásticos reciclados". *Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria*. Consulta: 29 de diciembre de 2015.

HARPER, C.

1996 *Handbook of plastics, elastomers and composites*. New York: Editorial McGraw-Hill, pp.677.

HARRIS, J. y D. COWN

1991 "Basic Wood properties. In: Properties and uses of New Zealand Radiata Pine". *Forest Research Institute*. Rotorua, volumen 1, pp. 6.1-6.28.

HELLMUTH, E. Y B. WUNDERLICH

1965 "Superheating of Linear High Polymer Polyethylene Crystals". *Journal of Applied Physics*. Volumen 36, pp. 3039-3044.

HIETALA, M.

2011 *Extrusion processing of wood raw materials for use un wood-polymer composites*. Sweden: Lulea University of Technology.

HILLIG, Éverton y otros

2002 "Modelagem de misturas na fabricacao de compósitos polímeros-fibra utilizando polietileno e serragem de Pinus". *Ciencia Forestal*, SANTA Maria. Volumen 16, número 3, pp. 343-351.

HRISTOV, V., M. KRUMOVA y G. MICHLER

2004 "Modified Polypropylene Wood Flour Composites. II. Fracture, Deformation, and Mechanical Properties". *Journal of Applied Polymer Science*. Volumen 92, número 2, pp. 1286-1292.

HULL, D.

1981 "An Introduction to Composite Materials". Cambridge University Press, Cambridge. pp. 3-4.

ICHAZO, M.N. y otros

2001 "Polypropylene/Wood flour composites: treatments and properties". *Composite Structures*. Volumen 54, número 2, pp. 207-214.

IEB LTDA. Maderas de calidad

*Especies*. Consulta: 27 de diciembre de 2015.

<http://ieb.com.bo/index.php/especie>

INTRATEC.

2013 "Cap 1: Polypropylene Manufacturing". Polypropylene via Gas Phase Process. Consulting As Publication, pp. 11.

JESKE, H.; A. SCHIRP y F. CORNELIUS

2012 "Development of a thermogravimetric analysis (TGA) method for quantitative analysis of wood flour and polypropylene in wood plastic composites (WPC)". *Thermochimica Acta*. Volumen 543, pp. 16-171.

JESKEA, Helene; Arne SCHIRPB y Frauke CORNELIUS

2012 "Development of a thermogravimetric analysis (TGA) method for quantitative analysis of wood flour and polypropylene in wood plastic composites (WPC)" *Thermochimica Acta*. Volumen 543, pp. 165–171.

JIANGTAO, Shi, Xing DONG y Li JIAN

2012 "FTIR Studies of the changes in wood chemistry from wood forming tissue under inclined treatment". *Energy Procedia*. Volumen 16, pp. 758-762.

JOSEPH, K., S. THOMAS, C. PAVITHRAN

1996 "Effect of chemical treatment on the tensile properties of short sisal fibre-reinforced polyethylene composites". *Polymer*. Volumen 37, número 23, pp. 5139-5149.

KACZMAREK, Halina y otros

2004 "Effect of short wavelength UV-irradiation on ageing of polypropylene/cellulose compositions". *Polymer Degradation and Stability*. Volumen 88, pp. 189-198.

KAZAYAWOKO, M; J. BALATINECZ; L.MATUANA

1999 "Surface modification and adhesion mechanisms in woodfiber-polypropylene composites". *Journal of Materials Science*. Volumen 34, pp. 6189

KHAZAEI, J.

2008 "Water absorption characteristics of three wood varieties". *Cercetări Agronomice în Moldova*. Volumen. XLI, número. 2 (134), pp. 5-15.

KISSEL W. y J. HAN

2003 Polypropylene: Structure, Propylene: Structure, Properties, Manufacturing Processes and Applications. Publicado en Karian G. (ed.) Handbook of Polypropylene and Polypropylene Composites. Nueva York: Marcel Dekker Inc., Segunda Edición, pp. 26-36.

KLYOSOV, Anatole

2007 Wood-plastic composites. John Wiley & Sons.

KUMARI, Rashmi

2008 *Fundamental study on highly-filled wood plastic composite*. Disertación doctoral. Kinki University. Graduate School of Agriculture - Department of Advanced Bioscience.

LEONARDO DA VINCI PILOT PROJECT

2008 "Educational Materials for Designing and Testing of Timber Structures- TEMTIS" Handbook 1 – Timber Structures.

Li, Y.

2011 "Wood polymer composites", in P. Tesinova (Ed.), *Advances in Composite Materials - Analysis of Natural and Man-Made Materials*. Consulta: 10 de enero de 2016.

<http://www.intechopen.com/books/advances-in-composite-materials-analysis-of-natural-and-manmade-materials/wood-polymer-composites>

LI, Ming-Yu y otros

2015 "Structural characterization of steam-heat treated *Tectona grandis* woods analyzed by FT-IR and 2D-IR correlation spectroscopy". *Chinese Chemical Letters*. Volumen 26, pp. 221-225.

LISPERGUER, M.y M. SOLÍS

2002 *Compuestos mixtos a base de plásticos y madera*. Universidad del Bío-Bío Departamento de Química, Facultad de Ciencias. Vol 11; pp.38.

MACHADO DE ANDRADE, Azarias y Lazlo MACEDO DE CARVALHO

1998 "Potencialidades energéticas de oito espécies florestais do estado do Rio de Janeiro". *Floresta e Ambiente*. Volumen 5, número 1, pp. 24-42.

<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/resisoli/peru/argres027.pdf>

MACHADO, A. y K. STUART

2000 A comparison of process configuration for compounding wood-plastics composites, USA, pp. 73-85.

MADSEN, D.

2011 Print reading for engineering & manufacturing technology. USA, pp.144-145,

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

2002 Some aspects related to the processing of natural fiberpolymer composites, pp. 416-421.

MARCOVICH, N. y otros

2004 “Rheology of particle suspensions in viscoelastic media. Wood flour-polypropylene melt”. *Rheol. Acta*. Volumen 43, pp. 293-303.

MARCOVICH, Norma.; María REBOREDO y Mirta ARANGUREN

1998 “Dependence of the mechanical properties of woodflour–polymer composites on the moisture content” *Journal of Applied Polymer Science*. Volumen 68, pp. 2069–2076.

MAT-SHAYUTI, M., M. ABDULLAH y P. MEGAT-YUSOFF

2013 “Water absorption properties and morphology of polypropylene/polycarbonate/polypropylene-graft-maleic anhydride blends”. *Asian Journal of Scientific Research*. Volumen 6, número 2, pp.167. Consulta: 5 de enero de 2016

<http://scialert.net/fulltext/?doi=ajsr.2013.167.176&org=11>

MATUANA, L. y otros

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

MATUANA , L.M. y otros

1999 “X-ray photoelectron spectroscopy study of silane-treated newsprint-fibers”. *Wood Sci. Technol*. Volumen 33, pp. 259–270.

MATUANA, L.M.

2009 “Recent research developments in wood plastic composites”. *Journal of Vinyl and Additive Technology*. Volumen15, número 3, pp.136–138.

MAZZANTI V. y F. MOLLICA

2015 In-line rheometry of polypropylene based Wood Polymer Composites. *Polymer Testing*. Volumen 47, pp. 30-35.

MILLER, Regis

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

MINAM-PERÚ: Ministerio del Ambiente

2012 Cuarto Informe Nacional de Residuos Sólidos Municipales y no Municipales: Gestión 2010-2011. Ministerio del Ambiente PERÚ. Lima: pp. 1-29.

MIRAVETE, A.

2003 Materiales Compuestos. Volumen 1. Reverté.

MONTEIRO, Paulo

s/f The structure & properties of wood [Diapositiva]. Consulta: 18 de diciembre de 2015.

<http://www.ce.berkeley.edu/~paulmont/CE60New/wood.pdf>

[http://plantarperu.com/guia\\_capirona.pdf](http://plantarperu.com/guia_capirona.pdf)

MYERS, G. y otros

1990 "Wood Flour/Polypropylene Composites: Influence of Maleated Polypropylene and Process and Composition Variables on Mechanical Properties2. *Int. J. of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials. Volumen 15*, pp. 21-44.

*Nicolas Ward-Perron.*

SF "Natural fibers reinforced thermoplastics (NFRTP) processed by roto molding". Denis Rodrigue Université Laval. Department of Chemical/Engineering. Quebec CUy. Quebec. Canada. GI V OA6.

NJAFI, S.

2013 "Use of recycled in wood plastic composites – A review". *Waste Management. Volumen 33*, pp. 1898-1905.

NUÑEZ, A. y otros

2003 "Mechanical Characterization of Polypropylene-Wood Flour Composites. *Journal of Applied Polymer Science. Volumen 88*, pp. 1420-1428.

OLAKANMI, E. y M. STRYDOM

2016 "Critical materials and processing challenges affecting the interface and functional performance of wood polymer composites (WPCs)". *Materials Chemistry and Physics*. Article in press.

OSKMAN, K. y H. LINDBERG

1998 "Influence of Thermoplastic Elastomers on Adhesion in Polyethylene – Wood Flour Composites". *Journal of Applied Polymer Science*. Volumen 68, pp. 1845-1855.

OKSMAN, K. y M. BENGTSSON

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, pp. 655-671

PACHECO, E.

2000 "Análise de impacto ambiental devido a resíduos poliméricos". *Revista Plástico Moderno*. Número. 308, pp. 40-51.

PANDEY, K. K.

1999 "A study of chemical structure of soft and hardwood and wood polymers by FTIR spectroscopy". *Journal of Applied Polymer Science*. Volumen 71, número12, pp. 1969-1975.

PATTI, A. y otros

2015 "Flexural properties of multi-wall carbón nanotube/polypropylene composites: Experimental investigation and nonlocal modeling". *Composite Structures*. Volumen 131, pp. 282-289.

POELT, P. y otros

2010 "Tensile tests in the environmental scanning electron microscope (ESEM) – Part I: Polypropylene homopolymers". *Polymer*. Volumen 51, pp. 3203-3212.

PROYECTO DE APOYO A LA COORDINACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN DE ACCIÓN FORESTAL PARA BOLIVIA FAO-PAFBOL (GCP/BOL/028/NET)

2002 “Información técnica para el procesamiento industrial de 134 especies maderables de bolivia”. La Paz. Consulta: 07 de octubre de 2015.

<http://www.siforestal.org.pe/Archivo/Manual%20de%20identificacion.pdf>

RAJ R.; KOKTA B.; C. DANEALD

1990 *Wood flour as a low-cost reinforcing filler for polyethylene: studies on mechanical properties*, pp. 1851-1855.

RJEB, M. y otros

2005 “TG and DSC studies of natural and artificial aging of polypropylene”. *Physica A*. Volumen 358, pp. 212–217

ROSENZWEIG, N. y M. NARKIS

1981 “Sintering Rheology of Amorphous Polymers”. *Polymer Engineering and Science*. Volumen 21, pp. 1167-1170.

ROUSSY, L.; G. KEIL, M. REFORT; A. IACONIS y W. ABEDINI

2013 “Propiedades tecnológicas de la madera de *Citharexylum montevidense* (Spreng.) Mol. Espina de bañado”. *Quebracho*. Santiago del Estero, volumen 21, número 1 y 2, pp. 58-66.

<http://www.scielo.org.ar/pdf/quebra/v21n2/v21n2a01.pdf>

SALEMANE, M. y A. LUYT

2006 “Thermal and Mechanical Properties of Polypropylene – Wood powder Composites”. *Journal of Applied Polymer Science*. Volumen 100, pp. 4173-4180.

SANADI, A.; ROWELL R. y YOUNG R.

1993 “Evaluation of wood-thermoplastic-interphase shear strengths”. *Journal of Materials Science*. Volumen 28, pp. 6347.

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

2006 “The role of transient rheology in polymeric sintering”. *Rheol. Acta*. Volumen 45, pp. 825-839.

SHI, J. y J. DONG

2016 "Simultaneous cross-linking as a way to control physical growth of random ethylene-polypropylene copolymer during formation of high-impact polypropylene". *Polymer* 85, pp. 10-18.

SIBILLE, Ana María

2006 Guía de Procesamiento Industrial: Fabricación de muebles con maderas poco conocidas – LKS. Capirona Calycophyllum spruceanum. Consulta: 07 de octubre de 2015.

SIEGMANN, A. y otros

1986 "Effect of powder particle morphology on sintering behavior of polymers". *Journal of Materials Science*. Volumen 21, pp. 1180-1186.

SIERRA, Smith.

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

SIMPSON, William

1999 "Drying and control of moisture content and dimensional changes". *Wood handbook: wood as an engineering material*. Madison: pp. 12.1-12.20. Consulta: 27 de diciembre de 2015.

[http://www.unb.ca/fredericton/forestry/wstc/\\_resources/pdf/woodhandbook.pdf](http://www.unb.ca/fredericton/forestry/wstc/_resources/pdf/woodhandbook.pdf)

SIMPSON, William y Anton TENWOLDE

1999 "Physical Properties and Moisture Relations of Wood". *Wood handbook: wood as an engineering material*. Madison: pp. 3.1-3.24. Consulta: 27 de diciembre de 2015.

[http://www.unb.ca/fredericton/forestry/wstc/\\_resources/pdf/woodhandbook.pdf](http://www.unb.ca/fredericton/forestry/wstc/_resources/pdf/woodhandbook.pdf)

SMOLNA, Klara, T. GREGOR Y J. KOSEK

2013 "Morphological analysis of high-impact polypropylene using X-ray microCT and AFM". *European Polymer Journal*. Volumen 4, pp. 3966-3976.

SOBCZAK L., R. LANG y A. HAIDER

2012 "Polypropylene composites with natural fibers and wood – General mechanical property profiles". *Composites Science and Technology*. Volumen 72, pp. 550-557.

SOCALIGNANE, L. y otros

2015 "Reprocessing of wood flour reinforced polypropylene composites: Impact of particle size and coupling agent on composite and particle properties". *Polymer Degradation and Stability*. Volumen 113, pp. 72-85.

SOTELO, C. y otros

2007 "Genetic variation in Wood color and its correlation with tree growth and wood density of *Calycophyllum spruceanum* at an early age in the Peruvian Amazon". *New Forest*. Volumen 35, pp. 57-73.

SOTELO, Carmen, Jean BEAULIEU y Roger HERNÁNDEZ

2007 "Genetic variation in wood mechanical properties of *calycophyllum spruceanum* at an early age in the peruvian amazon". *Wood and Fiber Science*. Volumen 39, número 4, pp. 578 – 590.

SPEARS, M, A. EDER y M. CARUS

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

STARK, N. y M. Berger

1997 Effect of particle size on properties of wood-flour reinforced composites. pp. 134-143.

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. 421-432.

SUDDAR, A. y otros

2016 "Fracture resistance of hybrid pp/elastomer/wood composites". *Composite Structures*. Article in Press.

TEUBER, L. y otros

2016 “Wood polymer composites and their contribution to cascading utilization”.  
Journal of Cleaner Production. Volumen 110, pp. 9-15.

THIS IS CARPENTRY (TIC)

Understanding Moisture Content and Wood Movement. Consulta: 27 de diciembre  
de 2015.

<http://www.thisiscarpentry.com/2010/09/03/moisture-content-wood-movement/>

TIAN, Z. y otros

2013 “A model for the structure of impact polypropylene copolymers produced by  
an atmosphere-switching polymerization process”. Chemical Engineering  
Science. Volumen 101, pp. 686-698.

TINO, Rubén

2010 “Materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibra de vidrio”.  
Revista Cimbra. Número 390, pp. 43-45. Consulta: 15 de octubre de 2014.

[http://www.citop.es/publicaciones/documentos/Cimbra390\\_06.pdf](http://www.citop.es/publicaciones/documentos/Cimbra390_06.pdf)

UNITED NATIONS – INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION

2006 “Report: Medicinal plants originating in the Andean high plateau and central  
valleys region of Bolivia, Ecuador and Peru”

VALDERRAMA, Heiter

1993 “Características tecnológicas y uso industrial de nuevas especies forestales  
de la amazonia peruana”. *Folia Amazónica*. Iquitos, volumen 5, número 1-2,  
pp. 90-96.

VALENZUELA, Wilder

1977 “Evaluación de las propiedades físicas, y mecánicas de la capirona de altura  
(Loretoa peruviana Standl)”. Revista Forestal del Perú. Lima, volumen 7,  
número 1-2, pp. 1-5.

VASQUEZ, Ger

2014 *Rendimiento por grados de calidad en el aserrío de calycophyllum  
spruceanum (capirona) en el aserradero afresac, iquitos – 2013*. Tesis para

optar el Título de Ingeniero Forestal. Iquitos. Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP), Facultad de Ciencias Forestales. Consulta: 28 de diciembre de 2015.

<http://dspace.unapiquitos.edu.pe/bitstream/unapiquitos/406/1/Tesis.pdf>

VELARDE, E. y O. PÉREZ

1998 Reciclaje de Desechos Plásticos en el Perú. Revista de Química PUCP. Volumen XII, número 2, pp. 53-63.

WEBER, John y Carmen SOTELO

2005 "Variation and correlations among stem growth and wood traits of *Calycophyllum spruceanum* Benth. from the Peruvian Amazon.". *Silvae Genetica*. Volumen 54, número 1, pp. 31-41. Consulta: 27 de diciembre de 2015.

[https://www.researchgate.net/publication/255522764\\_Variation\\_and\\_correlations\\_among\\_stem\\_growth\\_and\\_wood\\_traits\\_of\\_Calycophyllum\\_spruceanum\\_Benth\\_from\\_the\\_Peruvian\\_Amazon\\_Silvae\\_Genet](https://www.researchgate.net/publication/255522764_Variation_and_correlations_among_stem_growth_and_wood_traits_of_Calycophyllum_spruceanum_Benth_from_the_Peruvian_Amazon_Silvae_Genet)

WECHSLERS A., S. HIZIROGLU

2007 Some of the properties of wood-plastic composites. *Building and Environment*. Volumen 42, pp. 2637-2644.

WIEDONHOEFT, A.

2010 "Structure and function of Wood". Publicado en *Wood Handbook – Wood as an Engineering Material*. Madison Wisconsin, USA Department of Agriculture.

WOLCOTT, M.P. y K. ENGLUND,

1999 "A technology review of wood-plastic composites, in: Proceedings of the 33rd International Particleboard Composites Material Symposium. pp. 103-111. Consulta: 10 de enero de 2016.

[http://wpcinfo.org/techinfo/documents/wpc\\_overview.pdf](http://wpcinfo.org/techinfo/documents/wpc_overview.pdf)

YALI, Li.

2014 "Characterization of acetylated eucalyptus wood fibers and its effect on the interface of eucalyptus wood/polypropylene composites". *Int. J. of Adhesion & Adhesives*. Volumen 50, pp. 96-101.

YOUNGQUIST, J.A.

1999 "Wood-based composites and panel products". Publicado en Forest Products Laboratory, Wood Handbook: Wood as an Engineering Material. U.S. Department of Agriculture, Wisconsin, EE.UU. pp. 10-10 a 10-26.

YOUNGQUIST, J. y A. KARMAKER.

1996 "Injection Molding of Polypropylene reinforced with short jute fibers". *Journal of Applied Polymer Science* 62, pp. 1147-1151.

ZHANG Y, H. y otros

2009 Studies of surface-modified wood flour/polypropylene composites

