

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

“OBTENCIÓN DE BIOCOMPUESTOS A PARTIR DE RESIDUOS DE
MADERA (SAWDUST) Y RESINA TERMOPLÁSTICA”

“OBTAINING COMPOUNDS FROM SAWDUST AND THERMOPLASTIC
MATRIX”

Trabajo de titulación previo a la obtención
del título de Ingeniero Mecánico.

Autores:

Darwin Damian Vicuña Vicuña

Director:

Ing. Jorge Fajardo Seminario

Cuenca, Julio de 2016

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

“OBTENCIÓN DE BIOCOMPUESTOS A PARTIR DE RESIDUOS DE
MADERA (SAWDUST) Y RESINA TERMOPLÁSTICA”

“OBTAINING COMPOUNDS FROM SAWDUST AND THERMOPLASTIC
MATRIX”

Trabajo de titulación previo a la obtención
del título de Ingeniero Mecánico.

Autores:

Darwin Damian Vicuña Vicuña
dvicunav@est.ups.edu.ec

Director:

Ing. Jorge Fajardo Seminario
jfajardo@ups.edu.ec

Cuenca, Julio de 2016

Al creador

Por darme la vida y poder hacer de esta un sueño

A mis Padres

Ustedes son la razón de mi éxito gracias por todo, Luis y Yolanda

A mis Hermanos

Por estar ahí siempre, Javier, Cristian, Juan, Verónica y Jessica

AGRADECIMIENTOS

Al creador por iluminar mi camino...

A mis padres, Luis Ovidio Vicuña Montero y Olga Yolanda Vicuña Muñoz, por darme la vida y formarme con buenos valores que hacen de mí un mejor ser humano les estaré agradecido toda la vida.

A mis hermanos por su ayuda incondicional por compartir los momentos agradables y los no tan agradables, siempre puedo contar con ustedes. Javier, Cristian, Juan, Verónica y Jessica.

Un sincero agradecimiento al Ingeniero Jorge Fajardo S. por su ayuda incondicional y desinteresada en este proyecto, mi respeto y estima.

A mi familia y amigos por el apoyo brindado durante todo este tiempo y el del porvenir.

A mis docentes por la sana labor de enseñar.

Darwin Damian

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo Darwin Damian Vicuña Vicuña, con documento de identificación N° 0302169800, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado intitulado: “Obtención de biocompuestos a partir de residuos de madera (sawdust) y resina termoplástica”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico con mención en Producción, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Darwin Damian Vicuña Vicuña

CI. 0302169800

CERTIFICACION

Yo declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “OBTENCIÓN DE BIOCOMPUESTOS A PARTIR DE RESIDUOS DE MADERA (SAWDUST) Y RESINA TERMOPLÁSTICA “, realizado por Darwin Damian Vicuña Vicuña, obteniendo denominar el trabajo como proyecto técnico que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como Trabajo de Titulación.

Cuenca, Julio del 2016

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Jorge Fajardo S.', with several horizontal and diagonal strokes crossing it.

Ing. Jorge Fajardo S., MSc.

C.I. 0102495777

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Yo, Darwin Damian Vicuña Vicuña, con numero de cedula N° 0302169800, el trabajo de grado que presento, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecida en la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana, intitulado “OBTENCIÓN DE BIOCOMPUESTOS A PARTIR DE RESIDUOS DE MADERA (SAWDUST) Y RESINA TERMOPLÁSTICA” certifico que el total contenido de este proyecto técnico es de mí exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, Julio del 2016



Darwin Damian Vicuña Vicuña

C.I. 0302169800

RESUMEN

El problema radica en la naturaleza hidrofóbica de las matrices poliméricas y la naturaleza hidrofílica de las fibras vegetales que dificulta su mezcla y procesamiento. Para ello se realizó un estudio profundo del estado del arte de materiales compuestos poliméricos reforzados con fibras naturales de madera para poder obtener un compuesto de fibras de harina de madera de eucalipto y pino con distintas matrices termoplásticas. En este trabajo se evalúa el efecto de un agente de acople en la adherencia de los dos componentes. Se generó una metodología para la obtención y acondicionamiento de la harina de madera. Además se desarrolló un procedimiento completo para la obtención de partes y piezas moldeadas por extrusión e inyección. Finalmente se evaluaron los efectos sobre la fluidez y adherencia que tiene el MAPP mostrando gran efectividad tanto como agente de acople ya que incrementó el componente polar y como lubricante ya que incrementó el índice de fluidez del compuesto. Las pruebas realizadas en el Melt Index en los materiales compuestos poliméricos de eucalipto y pino disminuyen el índice de fluidez en 38% aproximadamente, con la presencia del anhídrido maleico MAPP mejora el 12 % en la fluidez del compuesto, generando un aumento en el componente polar provocando una mejor adherencia entre matriz y la fibra.

Palabras clave: Fibras naturales, compuestos poliméricos, resinas termoplásticas, MFI, extrusión, compresión en caliente, inyección.

ABSTRACT

The problem lies in the hydrophobic nature of the polymeric matrix and the hydrophilic nature of plant fibers that hinders mixing and processing. This requires a thorough study of the state of the art of polymeric composites reinforced with natural wood fibers to obtain a compound fiber wood flour eucalyptus and pine with different thermoplastic matrices was carried out. In this study the effect of coupling agent is evaluated in the adhesion of the two components. It generated a methodology for obtaining and conditioning of wood flour. In addition a complete procedure for obtaining parts and castings takes place by extrusion and injection. Finally the effects on the flow and adhesion having the MAPP showing highly effective both as coupling agent increased as the polar component and a lubricant as increased melt index of the compound were evaluated.

Tests on the Melt Index in polymeric composites eucalyptus and pine decrease flow index approximately 38%, the presence of maleic anhydride MAPP 12% improvement in the flowability of the compound, generating an increased polar component causing better adhesion between matrix and fiber.

Keywords: Natural fibers, polymeric compounds, thermoplastic resins, MFI, extrusión, hot compression composite, injection

Índice General

AGRADECIMIENTOS	ii
CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR	iii
CERTIFICACION	iv
DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD	v
RESUMEN	vi
ABSTRACT	vii
Índice General	viii
Lista de figuras	xii
Lista de tablas	xv
1. ESTADO DEL ARTE DE MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON RESIDUOS DE MADERA	1
Introducción	1
1.1 Antecedentes del proyecto.....	2
1.1.2 Planteamiento del problema	4
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivo General.....	4
1.2.2 Objetivos Específicos	4
1.3 Revisión de la literatura	4
1.4 Metodología.....	5
1.5 Resultados.....	5
1. 6 Compuestos reforzados con Harina de madera (WPC)	5
1.7 Aditivos como acoplamiento	9
1.8 Marco Teórico	10
1.8.1 Materiales compuestos de madera WPC	10
1.8.2 Clasificación de los materiales compuestos WPC.....	11
1.8.3 Bases Teóricas.....	12
1.8.3.1 Celulosa	12
1.8.3.2 Hemicelulosa	13
1.8.3.3 Lignina	13
1.8.3.4 Obtención de residuos de madera	13
1.8.3.5 Sawdust/Aserrín (polvo de madera).....	14

1.8.4 Aspectos Ambientales.....	14
1.8.5 Matriz Polimérica.....	15
1.8.5.1 Matriz polimérica termoestable	15
1.8.5.2 Matriz polimérica con materiales termoplásticos.....	16
1.8.5.3 Materiales termoplásticos.....	16
1.8.5.4 Polietileno de alta densidad como matriz Polimérica.....	17
1.8.5.5 Polivinilo de Cloruro como matriz polimérica	18
1.8.5.6 Aditivos para resinas de polivinilo de cloruro	19
1.8.5.7 Plastificantes	19
1.8.5.8 Estabilizadores.....	19
1.8.6 Polietileno de baja densidad como matriz polimérica	20
1.8.7 Polipropileno como matriz Polimérica	21
1.8.7.1 Estructura del polipropileno.....	21
1.8.7.2 Propiedades del Polipropileno	22
1.9 Aplicaciones de los compuestos WPC	22
1.10 Conclusiones	24
2. CARACTERIZACIÓN Y OBTENCIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS POLIMÉRICOS A PARTIR DEL SAWDUST.....	25
2.1 Obtención de la materia prima a partir del sawdust.....	25
2.2 Resinas termoplásticas	26
2.2.1 Polietileno de alta densidad	26
2.2.2 Polivinilo de cloruro.....	26
2.2.3 Polietileno de baja densidad	27
2.2.4 Polipropileno	28
2.3 Proceso de obtención de la harina de madera a partir de sawdust.....	28
2.3.1 Flujograma del proceso de obtención de la harina a partir de sawdust	28
2.3.2 Recolección de residuos de madera sawdust.....	29
2.3.3 Proceso de secado del sawdust.....	30
2.3.4 Proceso de trituración de los residuos de madera sawdust.....	30
2.3.5 Proceso de selección de tamaños de los residuos de madera sawdust.....	31
2.3.6 Resultados de la selección de tamaños de los residuos de madera sawdust	31
2.4 Proceso experimental y obtención del material compuesto	32
2.4.1 Flujograma del proceso de extrusión y pelletizado	32
2.4.2 Proceso de extrusión de la madera plástica WPC	33

2.4.3 Obtención de pellets del compuesto WPC	36
2.4.4 Proceso de pelletizado del Polivinilo de cloruro.....	37
2.4.4.1 <i>Formulación para el proceso de extrusión del PVC</i>	37
2.4.4.2 <i>Proceso y obtención de Pellets de madera plástica - PVC</i>	38
2.5 Conclusiones	40
3. ANÁLISIS DE LA INTERFASE Y ENERGÍA LIBRE SUPERFICIAL DE COMPUESTOS POLIMÉRICOS DE POLIPROPILENO Y POLIVINILO DE CLORURO CON FIBRAS DE MADERA DE EUCALIPTO Y PINO	41
3.1 Experimentación realizada para la obtención de probetas encapsuladas	41
3.2 Procedimiento para la obtención de probetas encapsuladas por compresión en caliente.....	42
3.2.1 Equipo para la compactación de probetas	43
3.2.2 Obtención de probetas encapsuladas por compresión en caliente	44
3.2.3 Probetas encapsuladas de por compresión en caliente	45
3.2.4 Análisis del polipropileno con eucalipto como refuerzo	46
3.2.4.1 <i>Polipropileno con eucalipto como refuerzo</i>	46
3.2.4.2 <i>Polipropileno con eucalipto como refuerzo con MAPP</i>	48
3.2.5 Análisis del polipropileno con Pino como refuerzo	50
3.2.5.1 <i>Polipropileno con Pino como refuerzo</i>	50
3.2.5.2 <i>Polipropileno con Pino como refuerzo con MAPP</i>	52
3.2.6 Análisis del polivinilo de cloruro con Eucalipto como refuerzo.....	54
3.2.7 Calculo de Rugosidades de los materiales compuestos poliméricos	56
3.3 Ángulo de contacto.....	57
3.3.1 Método experimental.....	57
3.3.2 Procedimiento experimental de obtención del ángulo de contacto superficial	58
3.3.3 Análisis de Resultados	63
3.4 Conclusiones	63
4. ÍNDICE DE FLUIDEZ Y PRUEBAS DE INYECCIÓN EN COMPUESTOS POLIMÉRICOS DE POLIPROPILENO Y POLIVINILO DE CLORURO CON FIBRAS DE MADERA DE EUCALIPTO Y PINO	
4.1 Determinación de MFI de los compuestos WPC	64
4.2 Proceso de obtención del Índice de Fluidéz	65
4.2.1 Método de prueba estándar para Índice de fluidez ASTM D 1238	65
4.2.2 Resultados del Melt Index	66
4.2.3 Análisis de resultados	67
4.3 Experimentación realizada para la obtención de probetas inyectadas.....	68
4.4 Obtención de probetas normalizadas	69

4.4.1 Análisis de resultados	72
4.5 Inyección del PVC – Harina de Madera de Eucalipto a partir de Sawdust	72
4.6 Conclusiones	74
Conclusiones Generales.....	75
Recomendaciones.....	76
Recomendaciones y trabajo futuro.....	77
Referencias	78
ANEXOS	82

Lista de figuras

Figura 1.1: Crecimiento de la demanda de fibras naturales para el uso en compuestos en eua (2000)[11]	4
Figura 1.2 a: Interfase de la matriz [28]	11
Figura 1.2 b: Diagrama de tensión-esfuerzo [28]	11
Figura 1.3: Clasificación de los materiales compuestos madera-plástico wpc [4].....	11
Figura 1.4: Molécula de la celulosa [29]	12
Figura 1.5: Estructura química del monómero de etileno [29]	17
Figura 1.6: Estructura monómero y polímero del pvc [7]	18
Figura 1.7: Estructura química del propileno [16].....	21
Figura 1.8: Tipos de tácticidad del polipropileno[40].....	21
Figura 1.9: Demanda de compuestos de madera plástica [10]	23
Figura 2.1: Flujograma de proceso de obtención de harina de madera	29
Figura 2.2 a: Residuos de madera de eucalipto	29
Figura 2.2 b: Residuos de madera de pino	29
Figura 2.3: Horno memmert un 110.....	30
Figura 2.4: Molino de corte retsch sm 100.....	30
Figura 2.5: Tamizadora retsch as 200	31
Figura 2.6: Flujograma de extrusión y pelletizado	32
Figura 2.7: Extrusora dr. Collin E-20 T	33
Figura 2.8 a: Pellets material termoplástico.....	34
Figura 2.8 b: Harina de madera de eucalipto	34
Figura 2.8 c: Harina de madera de pino	34
Figura 2.8 d: Anhídrido maleico MAPP	34
Figura 2.9: Molino de cuchillas	35
Figura 2.10 a: Perfiles de PP+ pino	36
Figura 2.10 b: Perfiles de PP+ eucalipto	36
Figura 2.10 c: Perfiles de PEAD-4% pigmentado rosado	36
Figura 2.10 d: Perfiles de PEBD-4% pigmentado rojo	36
Figura 2.11: Pelletizadora DR. Collin E-20 T	36
Figura 2.12 a: Pellets de PP + pino	37

Figura 2.12 b: Pellets de PP + eucalipto	37
Figura 2.12 c: Pellets PEAD+4% pigmentado rosado.....	37
Figura 2.12 d: Pellets PEBD+4% pigmentado rojo	37
Figura 2.13: Molino mezclador centrifugo (Consulplast s.a.).....	39
Figura 2.14: Pellets en polvo PVC-eucalipto.....	40
Figura 3.1: Equipo de compresión en caliente	41
Figura 3.2: Diagrama de procedimientos para la obtención de probetas encapsuladas [47]	42
Figura 3.3: Cartuchos de calefacción.....	43
Figura 3.4: Controlador de temperatura camco	43
Figura 3.5: Prensa hidráulica	44
Figura 3.6: Balanza electrónica modelo 20002 - 0,01g	44
Figura 3.7: Microscopio olympus bx51m	45
Figura 3.8: Probeta compactada de polipropileno - eucalipto.....	46
Figura 3.9: Imagen 10x / 0.30 bd de polipropileno - eucalipto	47
Figura 3.10: Probeta compactada de polipropileno – eucalipto - MAPP.....	48
Figura 3.11: Imagen 10x / 0.30 bd de polipropileno - eucalipto -MAPP	49
Figura 3.12: Probeta compactada de polipropileno - pino	50
Figura 3.13: Imagen 10 x / 0.30 bd de polipropileno - pino	51
Figura 3.14: Probeta compactada de polipropileno - pino - MAPP	52
Figura 3.15: Imagen 10 x / 0.30 bd de polipropileno-pino-MAPP.....	53
Figura 3.16: Probeta compactada de polivinilo de cloruro - eucalipto	54
Figura 3.17: Imagen 10 x / 0.30 bd de polivinilo de cloruro - eucalipto	55
Figura 3.18: Parámetros de rugosidad [44]	56
Figura 3.19: Esquema del ángulo de contacto [44]	57
Figura 3.20: Goniómetro ksv modelo cam 100	58
Figura 3.21: Pruebas de ángulo de contacto mediante cam 100.....	59
Figura 3.22: Mediciones de la energía superficial de compuestos poliméricos con coneucalipto	61
Figura 3.23: Mediciones de la energía superficial de compuestos poliméricos con Pino	62

Figura 3. 24: Mediciones de la componente polar de compuestos poliméricos con eucalipto	62
Figura 3. 25 : Mediciones de la componente polar de compuestos poliméricos Con pino.....	63
Figura 4.1: Melt Index.....	64
Figura 4.2: Inyectora automática DR. BOY 35E	68
Figura 4.3: Geometría obtenida según la norma ISO tipo B 527.....	70
Figura 4.4: Dimensiones de la probeta según la norma ISO tipo B 527	70
Figura 4.5: Control de mando de la inyectora DR. BOY 35E.....	70
Figura 4.6 a: Probeta de PP-eucalipto- 5% lubricante.....	71
Figura 4.6 b: Probeta de PP-pino- 5% lubricante	71
Figura 4.6 c: Probeta de PP-eucalipto-MAPP-5% lub.	71
Figura 4.6 d: Probeta de PP-pino-MAPP-5% lub.	71
Figura 4.7: Inyectora Dakumar DKM – SV330 (Consulplast)	72
Figura 4.8: Producto inyectado con PP.....	73
Figura 4.9: Producto inyectado con PVC-eucalipto	73

Lista de tablas

Tabla 1.1: Propiedades y efecto de la mezcla del material madera-plástico [10].	6
Tabla 1.2: Propiedades de dureza y densidad del material [10].	7
Tabla 1.3: Formulaci3n de compuestos [24]	9
Tabla 1.4: Propiedades del MAPP [10].	10
Tabla 1.5: Características de la celulosa en la madera [29]	13
Tabla 1.6: Principales ventajas y desventajas del empleo del sawdust/aserrín	14
Tabla 1.7: Propiedades de los materiales termoplásticos [36]	17
Tabla 1.8: Propiedades principales del polietileno de alta densidad [7]	18
Tabla 1.9 : Propiedades mecánicas del pvc.	19
Tabla 1.10: Propiedades principales del polietileno de baja densidad [7]	20
Tabla 1.11: Propiedades mecánicas del polipropileno [43].	22
Tabla 1.12: Propiedades térmicas del polipropileno [43].	22
Tabla 2.1: Composici3n química del eucalipto y pino [8]	25
Tabla 2.2: Crincipales propiedades del PEAD Braskem Ha 7260 [44]	26
Tabla 2.3: Propiedades del PVC – 500. Mexichem resinas colombia s.a.s.(Consulplast s.a.)	27
Tabla 2.4: Propiedades del LLDPE Sabic M500026 [45]	27
Tabla 2.5: Propiedades del polipropileno Seetec H1500 [46]	28
Tabla 2.6: Porcentajes del proceso de tamizado [autor]	31
Tabla 2.7: Formulasiones para el proceso de extrusi3n [autor]	34
Tabla 2.8: Diámetros de perfiles extruidos de materiales compuestos [autor].	35
Tabla 2.9: Formulaci3n para extrusi3n (consulplast) [autor]	38
Tabla 2.10: Formulaci3n para procesos de transformaci3n de plásticos [autor]	38
Tabla 3.1: Parámetros para la compactaci3n de probetas [autor]	45
Tabla 3.2: Calculo de las rugosidades de los materiales compuestos poliméricos [autor]	56
Tabla 3.3: Componentes de la energí3 libre superficiales [44]	58
Tabla 3.4: Resultados del ángulo de contacto en los compuestos [autor]	60
Tabla 3.5: Resultados de la energí3 de superficie por el método Fowkes [autor]	60
Tabla 3.6: Resultados de la energí3 de superficie por el método Wu [autor].	60

Tabla 4.1: Condiciones de prueba ASTM D 1238 [45].....	65
Tabla 4.2: Condiciones estándar para la masa de la muestra - ASTM D 1238 [45].....	66
Tabla 4.3: Resultados del Melt Index para el polipropileno [autor].....	67
Tabla 4.4: Resultados del Melt Index para el polivinilo de cloruro [autor]	67
Tabla 4.5: Parámetros de la inyectora DR. BOY 35E con polipropileno [38]	69
Tabla 4.6: Parámetros optimizados en la inyectora DR. Boy 35E.....	71
Tabla 4.7: Propiedades de la inyectora Dakumar DKM – SV330 (consulplast) [46].....	73
Tabla 4.8: Parámetros empleados para inyección (Consulplast)	73

CAPITULO 1

1. ESTADO DEL ARTE DE MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON RESIDUOS DE MADERA

Introducción

En la industria automotriz la falta de alternativas en nuevos materiales y la necesidad de materias primas renovables, ha visto obligado a recurrir a nuevos materiales poliméricos reforzados con fibras naturales. La comisión (European Guideline 2000/53/eg) apoya una amplia investigación en el área de plásticos biodegradables en el marco del Séptimo Programa Marco (2006-2010)[1]. En la industria norteamericana USA (FCTV) ha promovido el desarrollo de tecnologías nuevas y eficientes que permita contribuir con la protección de los ecosistemas globales[2].

En los últimos años, las fibras naturales y material particulado se han convertido en una alternativa como material de refuerzo o relleno para materiales de matrices plásticas. El uso de las fibras naturales ha tenido un creciente interés por parte de los investigadores, esto se debe al incremento en las propiedades mecánicas que le proporciona la celulosa y a los beneficios ecológicos.

En la actualidad el uso de las fibras y material particulado ha generado un método eficiente que actúa como refuerzo con altos módulos de elasticidad y resistencia mecánica, dando origen a un nuevo material compuesto que cuenta con características similares a los plásticos y la madera, como son los materiales WPC (wood plastic composites). El crecimiento de este tipo de materiales ha sido mucho mayor en Europa y los Estados Unidos, en donde actualmente el mercado supera las 600.000 ton/año [3].

En América Latina se han llevado a cabo varias investigaciones con el propósito de desarrollar materiales compuestos de plástico-madera, pero hasta el momento algunas han sido de manera sólo a nivel experimental y otras ya a punto de concretarse en proyectos, es el caso en países como Brasil, Chile, Argentina y Colombia que han sido pioneros en la investigación sobre la producción de materiales compuestos madera-plástico y resinas plásticas.

En Ecuador, en los últimos años, han surgido varios proyectos acerca del uso de las fibras naturales y material particulado de la madera como material de relleno o refuerzo y resinas plásticas. Las iniciativas han sido pocas y los resultados hasta hora han sido de carácter experimental, un país como Ecuador tiene la oportunidad de aprovechar la biodiversidad que posee, para crear materias primas naturales con moderadas propiedades mecánicas y convertirse en autodependiente, reduciendo la importación de materias primas contribuyendo con el desarrollo y la economía del país y de la región.

En el Ecuador, la transformación mecánica de la madera ha sido tradicionalmente utilizada para una amplia gama de productos y materiales para la construcción a partir de partículas de madera aserrada y reciclada. En la industria de muebles (Fábricas de muebles modulares, talleres y pequeñas fábricas de muebles) y en la fabricación de pallets, puertas, pisos, etc. [4].

Los compuestos de material particulado con base de matriz polimérica tienen la finalidad de disminuir el impacto ambiental, para ello surge la necesidad de usar materiales renovables y ecológicos como son los materiales particulado o los residuos agroindustriales que ofrecen facilidad en el procesamiento y generan alta productividad. Estos compuestos están siendo llamados a ser sustitutos de las fibras de vidrio y amianto debido a los beneficios ecológicos y económicos.

1.1 Antecedentes del proyecto

El concepto de material compuesto es muy antiguo, hay referencias bíblicas de ladrillos de arcilla reforzados con paja en el antiguo Egipto. A partir de 1907, el químico belga Leo Baekeland obtuvo por primera vez una resina termoestable. Baekeland calentó y aplicó presión en un recipiente especial a un fenol y un formaldehído para obtener una resina líquida que polimerizó y tomó la forma del recipiente. Su nombre, la bakelita.[5] este es uno de los primeros compuestos de madera-plástico que están formados por finas partículas de madera a las que se mezcla con resinas de fenol y formaldehído.

En 1940 se empieza a fabricar mediante la inyección de plásticos con matrices termoestables como una variación de la inyección de materiales termoplásticos. En la década de los cincuenta aparecen las primeras máquinas con tornillo sinfín.

En la actualidad países como Estados Unidos y varios pertenecientes a la Unión Europea, han enfocado su investigación y desarrollo a la producción de estos materiales, debido a que el

uso de este tipo de materiales puede disminuir costos al aprovechar todo el desperdicio y residuos de madera y de plásticos reciclado, siendo amigable con el medio ambiente.

Los materiales compuestos son la unión de dos o más materiales que poseen propiedades mecánicas físicas y químicas diferentes dentro de una estructura final de manera que las propiedades del material sean superiores que las de los componentes por separado. Los materiales compuestos de madera y plástico (WPC: del inglés *wood plastic composite*) son materiales formados básicamente de dos fases, una plástica puede ser termoestable o termoplástica continua denominada matriz y otra de refuerzo o relleno constituida de un componente de madera en cualquiera de sus formas (polvo de madera, aserrín, fibras vegetales, etc.)[6].

Una amplia gama de productos de madera-plástico que se fabrican en la actualidad incorporan los mismos productos, por un lado están los materiales termoplásticos, como son el polietileno de alta densidad (PEAD), el polietileno de baja densidad (PEBD), el polivinilo de cloruro (PVC) y el polipropileno (PP), estos materiales son los más utilizados en los procesos de producción y por otro lado están las fibras naturales y los residuos de madera en forma de partículas (SAWDUST)[7] [8].

Los resultados de esta combinación madera-plástico en anteriores estudios han sido sorprendentes e interesantes, pese a que utilizan materias primas muy baratas y su proceso de fabricación es de bajo nivel tecnológico, tienen un precio final en el mercado superior al de la madera tratada con productos químicos[9].

En el mercado mundial actual los materiales compuestos de madera-plástico (WPC), han experimentado un crecimiento de consumo, se estima en alrededor de 2,4 millones de toneladas métricas en 2011. En 2016, se estima en cerca de 4,6 millones de toneladas métricas y el aumento a una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) del 13,8% [10].

En países desarrollados como EEUU y varios de Europa los materiales madera-plástico WPC forman parte de un sector de gran crecimiento industrial, debido a que presentan buenas propiedades y tienen efectos ambientales positivos. El requerimiento de polvo de madera y otros residuos lignocelulósicos para su uso en WPC se ha triplicado en la última década como se muestra en la figura 1.1

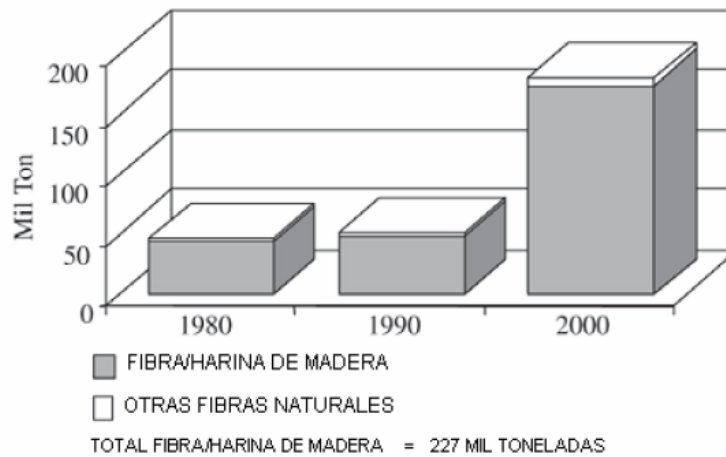


Figura 1.1: Crecimiento de la demanda de fibras naturales para el uso en compuestos en EUA (2000)[11]

1.1.2 Planteamiento del problema

Para la obtención de materiales compuestos poliméricos de fibras naturales y residuos de madera se plantea el problema en la naturaleza hidrofóbica de las matrices poliméricas y la naturaleza hidrofílica de las fibras vegetales que genera dificultad en la mezcla de unión matriz- fibra.

¿Para la obtención de compuestos poliméricos con sawdust: El uso de agente de acople tendrá efectos positivos sobre la fluidez del compuesto y sobre la adherencia fibra matriz?

¿Cómo procesar un material biocompuesto de matriz termoplástica reforzado con sawdust de forma eficiente y ecológica?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Obtener un material biocompuesto a base de una matriz termoplástica reforzado con harina de madera a partir de sawdust mediante técnicas de transformación de plásticos.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Obtener compuestos poliméricos de sawdust para refuerzo del material.
2. Compatibilizar las fibras de harina de madera a partir de sawdust con la matriz polimérica.
3. Obtener un material biocompuesto con fibras naturales de residuos de madera con propiedades mejoradas.

1.3 Revisión de la literatura

Se detalla desde el punto 1.6

1.4 Metodología

Se detalla en el capítulo 2

1.5 Resultados

Se detalla en el capítulo 3 y 4

1. 6 Compuestos reforzados con Harina de madera (WPC)

La madera plástica es un material formado a partir de residuos de madera y plásticos reciclables. El objetivo de la madera plástica es mezclar las ventajas del plástico con la madera reciclada, de manera que se aprovechan las ventajas estéticas y calidez de la madera natural pero mejorando sus propiedades al incorporar las ventajas del plástico como la durabilidad.

En general se puede entender la madera plástica a cualquier tipo de mezcla, dando como resultado un producto polimérico con características similares a las de la madera, para el objeto de este proyecto se estudiara el “*wood plastic composite*” (WPC), ya que este material cumple con las necesidades planteadas de este proyecto.

Los materiales WPC es el resultado de residuos de madera reciclable y plástico, de tal forma que se logre incrementar las propiedades mecánicas del nuevo material. Al estar compuesto por materiales reciclados, su impacto ambiental es relativamente bajo.

Las fibras naturales, al igual que el material particulado de madera, están constituidas con estructuras biológicas compuestas principalmente de celulosa, hemicelulosa y lignina [11]. En proporciones mucho más pequeñas también se pueden encontrar proteínas y algunos compuestos inorgánicos [9]. La presencia de la celulosa, hemicelulosa y lignina varía en gran medida a partir de fibras naturales como yute, madera, sisal, kenaf, etc, como polvo de madera WPC [12] la lignina actúa como una matriz que se incrustan en un elemento estructural muy rígido que es la celulosa, a diferencia de los otros componentes de fibras que poseen una estructura amorfa, la celulosa tiene una estructura cristalina en gran parte de su estructura. Generalmente en las fibras contienen de 60 – 80 % de celulosa y 5 -20 % de lignina, sin embargo en compuestos plásticos WPC no existe un consenso acerca de las condiciones ideales que deben cumplir las fibras para que su efecto reforzante sea el óptimo, esto se debe a distintos factores o características inherentes como especie vegetal, composición química, tamaño de partícula, morfología, tratamiento superficial y concentración en la mezcla [13].

La celulosa cristalina es un polímero natural que tiene el mayor módulo de elasticidad aproximadamente de 75 GPa a 136 GPa en comparación con la fibra de vidrio. Las propiedades que se buscan en este material como se han mostrado numerosos estudios son difíciles de predecir, por lo que se debió a recurrir a investigaciones similares para tener una referencia y poderlas analizar. En la tabla 1.1 se muestran las propiedades de un material de madera plástica obtenido mediante extrusión, utilizando el polipropileno como matriz plástica en el cual se estudian factores como el efecto de la mezcla en porcentaje de madera- plástico y el tamaño de la partícula.

Tabla 1.1: Propiedades y efecto de la mezcla del material madera-plástico [10].

Ítem	Peso Matriz (%)	Peso refuerzo (%)	Aditivo (MAPP)	Tamaño de partícula (mm)	Resistencia a Tracción (MPa)	Resistencia a Flexión (MPa)	Resistencia al Impacto (KJ / m ²)
1	100	0	---	---	24.62	40.24	220.6
2	70	30	---	0.45	29.10	53.13	85.8
3	73	25	2	0.18	27.68	56.02	104.1
4	73	25	2	0.30	24.91	46.02	93.0
5	73	25	2	0.45	25.17	44.8	87.2
6	58	40	2	0.45	27.62	50.71	74.5
7	65	33	2	0.45	28.46	50.9	75.0

Como se puede observar el efecto del tamaño de la partícula se muestra una disminución en la resistencia a la flexión, siendo el tamaño de la partícula de 0.45 mm, con una mezcla del 30 % de polvo de madera la que mostrara mejor resistencia a la Tracción de 29.1 MPa, y una alta resistencia a la Flexión de 53.13 MPa. Sin embargo el material registra una resistencia al impacto bajo de 85.8 KJ /m². El compuesto que muestra mayor resistencia de flexión es el compuesto del ítem 3 con un valor de 56.02 MPa.

Es importante también destacar propiedades como la densidad y la dureza que se experimentó en esta investigación que presento los siguientes resultados que se muestran en la tabla 1.2

Tabla 1.2: Propiedades de dureza y densidad del material [10].

Ítem	Peso Matriz (%)	Peso refuerzo (%)	Aditivo (MAPP)	Tamaño de la partícula (mm)	Dureza Shore (Escala D)	Densidad (gr/cm³)
1	100	0	---	---	72.728	0.90
2	70	30	---	0.45	75.98	1.03
3	73	25	2	0.18	73.76	1.01
4	73	25	2	0.30	73.6	1.01
5	73	25	2	0.45	73.926	1.01
6	58	40	2	0.45	76.378	1.08
7	65	33	2	0.45	74.594	1.04

Cuando se utiliza el polipropileno como matriz plástica se espera que el material sea muy liviano, es una de las ventajas que ofrece el polipropileno siendo el óptimo de 1.01 g/m³.

Las propiedades térmicas de la celulosa es un factor de enorme importancia, el efecto de la degradación térmica se muestra como un factor limitante de fabricación en los procesos de WPC [9] y [14]. La mayoría de las fibras naturales y polvo de madera pierden su rigidez aproximadamente a 160 °C y la lignina se degradan a aproximadamente 200 °C [15]. La degradación irreversible se da por el calor debido al cambio de viscosidad aumentando la degradación con la oxidación, son factores que influyen en gran medida la transferencia de calor. La conductividad térmica que se da en la madera es baja es una característica de un buen aislante [16].

Existen también importantes desventajas que se deben tomar en cuenta a la hora de la fabricación de materiales compuestos WPC como la retención, de humedad la biodegradabilidad, la fotodegradación, y a la alta incompatibilidad con matrices poliméricas matriz-refuerzo. Existen estudios sobre el mecanismo como la celulosa, hemicelulosa lignina presentes en la madera interaccionan con aditivos que son los encargados de realizar enlaces de hidrogeno que se encargan de la absorción de la humedad [13] [17]. Los tratamientos proporcionados de anteriores investigaciones están conducidas a reducir el impacto de las interacciones agua-madera [18].

En estudios recientes sobre los métodos de producción de fibras han demostrado que el proceso altera sus características ya que estos se obtienen mediante la fabricación de pasta termomecánica (TMP) o químico térmicomecánico (CTMP) [19]. Cualquiera de los métodos que se utilicen generan una alteración de la fibra, pulpa o polvo y una degradación mayor o menor de la lignina, sobretodo la desfibración CTMP [20] [21]. Particularmente en materiales compuestos WPC puede contener muchas fibras vegetales, principalmente en la madera ya que es común que se procesan en forma de polvo respetando un grano estándar. En estado de polvo proporciona un uso adicional como carga en una matriz en lugar de un refuerzo mecánico eficiente y ventajoso [11] [22].

En otras investigaciones se estudian los materiales compuestos de fibra o harina de madera (wood-flour) con polivinilo de cloruro (PVC) como material de refuerzo han generado una creciente demanda para la industria del plástico.

El polivinilo de cloruro (PVC) es cada vez más utilizado como una matriz de WPC, en particular en el área de la construcción y edificación tales como terrazas, esgrima, ventanas o puertas lineales. Existen también otros mercados potenciales como la industria automotriz. Debido a que este compuesto posee buenas propiedades mecánicas y alta resistencia a la humedad, los hongos y los rayos UV, es resistente a la radiación, es reciclable y relativamente barato y de fácil procesamiento.

El efecto de la madera o el contenido de fibra natural, como el tamaño de partículas de madera de WPC con harina de madera blanda de tamaños de 0,125 - 0,841 mm, se encontraron que las partículas más pequeñas dieron mejor resistencia a la flexión cuando la WPC se utilizó la harina de madera blanda [23].

El Polivinilo de cloruro adicionado con harina de madera (WF-PVC), es un sistema complejo por lo que se ha recurrido a varias investigaciones donde se han estudiado el comportamiento del PVC y de lignocelulosa. La diversidad de los resultados de estos estudios son difíciles de interpretar [7], esto se debe a muchos factores principalmente tales como, tipo termoplástico, la composición madera-plástico, el tamaño de partículas de madera, contenido de aditivos en las formulaciones y parámetros de procesamiento.

En una investigación anterior [24] se experimentó con un PVC SG-5, el grado de polimerización correspondiente fue aproximadamente 1000, el tamaño de las partículas

utilizadas entre un intervalo de 198 - 350 μm . El compuesto estabilizador térmico utilizado fue *Rare-Earth*, usando un plastificante Dioctyl-Phthalate, también fue utilizado el aditivo polipropileno injertado con anhídrido maleico (MAPP), en la tabla 1.3 se puede observar las composiciones utilizadas.

Tabla 1. 3: Formulación de compuestos [24]

Muestras	PVC	Harina de Madera (WF)	Estabilizador Rare-Earth	Plastificador Dioctyl-Phthalate	MAPP
Harina de Madera (WF)	---	100	---	---	---
PVC	100	---	6	3	5
WF – PVC	100	30	6	3	5

Todos los componentes de las muestras se mezclaron en un molino de dos rodillos en el lapso de 3 min, la temperatura de trabajo controlada era entre 155 - 160 °C. El espesor final se le dio en $4 \pm 0,1$ mm, de las hojas de la máquina de moldeo de prensado en caliente a una temperatura de 160 °C durante 5 min. Para finalizar se cortaron en modelos con dimensiones de 100 × 100 × 4 mm, para las pruebas correspondientes.

Se realizaron pruebas térmicas y de degradación dando como resultado el comportamiento en la combustión de materiales compuestos WF-PVC es similar a la de PVC, obteniendo un resultado mayor 17,3% de la composición de WF-WPC que el PVC. Los resultados mostraron que la harina de madera en WF-PVC puede acelerar la formación de carbón.

Una comparación de la curva efectiva del calor de la combustión (EHC) de materiales compuestos de PVC-WF con la de PVC y madera de harina, la EHC de WF-PVC es mayor que el de los otros al principio de la combustión, la razón puede ser debido al HCl, que viene de la degradación de PVC. El cloruro de hidrógeno (HCl) puede catalizar la degradación de la celulosa en materiales compuestos [25].

1.7 Aditivos como acoplamiento

Los agentes de acople son muy importantes para lograr una buena compenetración entre la madera y el plástico, ya que de ello dependen las propiedades finales del material. Los aditivos tienen ventajas como reducir la absorción de humedad, en materiales compuestos WPC el

pequeño tamaño de partícula es importante ya que puede duplicar las propiedades de resistencia a la tensión y a la flexión de compuestos de madera [26].

Un estudio realizado por Myers et al (1991) [27]. Dio a conocer un factor de integración, la proporción del polímero, el tamaño de partícula de un polvo de madera, la presencia de un agente de acoplamiento llamado anhídrido maleico (MAPP) y el número extrusiones utilizados en la fabricación [27]. La cantidad de MAPP es el factor importante ya que su ausencia impide una buena adherencia. El peso del componente que se experimentó se mezcló con el polipropileno en una concentración del 2% dando los siguientes resultados que se muestran en la tabla 1.4

Tabla 1.4: Propiedades del MAPP [10].

Propiedades	Ensayos ASTM	Unidades	Valor
Índice de fluidez (2.16 kg/190 °C)	D-1238	g/10 min	80 – 90
Temperatura de fusión	---	°C	150
Densidad	---	g/cm ³	0.96
Contenido de anhídrido maléico	D-792	wt %	1.4

1.8 Marco Teórico

1.8.1 Materiales compuestos de madera WPC

La estructura de los materiales compuestos WPC (wood plastic composite) se forma a partir de la mezcla de dos o más componentes con el fin de obtener un nuevo material final, que sus constituyentes estén por separado pero con mejores propiedades.

Los compuestos reforzados con fibras o material particulado de polvo de madera se diferencian de los otros materiales compuestos debido a la diferencia de nivel molecular de sus componentes y la capacidad de ser separados por métodos mecánicos. Los materiales constituyentes del WPC están formados por dos fases, una continua denominada matriz y otra dispersa denominada refuerzo, En la figura 1.2 a se muestra La matriz que se encuentra separada del refuerzo por medio de la interfase.

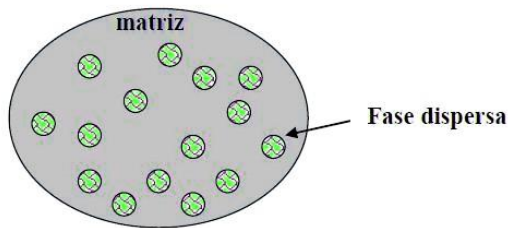


Figura 1.2 a: Interfase de la matriz [28]

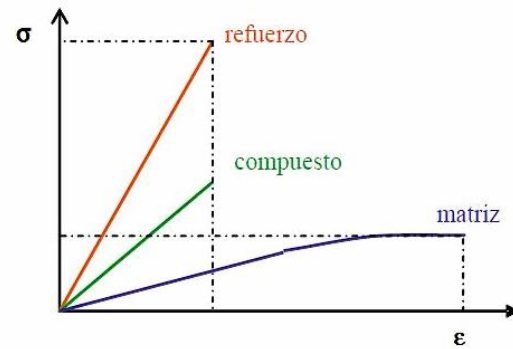


Figura 1. 2 b: Diagrama de tensión-esfuerzo [28]

Los materiales compuestos trabajan juntos, de manera que mejora las propiedades del nuevo material, pero cada uno permanece en su forma original sin alterar su estructura molecular como se muestra en la figura 1.2 b. La estructura y propiedades del material madera-interfase-matriz polimérica condicionan las propiedades físicas y mecánicas del material compuesto final.

1.8.2 Clasificación de los materiales compuestos WPC

Los materiales compuestos madera-plástico (WPC) se pueden dividir en varios grupos. El primer grupo está conformado por los compuestos a base de madera que utilizan una resina termoestable como adhesivo. El segundo grupo comprende los materiales compuestos termoplástico-madera y los materiales compuestos con matrices termoestables, la clasificación se presenta en la figura 1.3

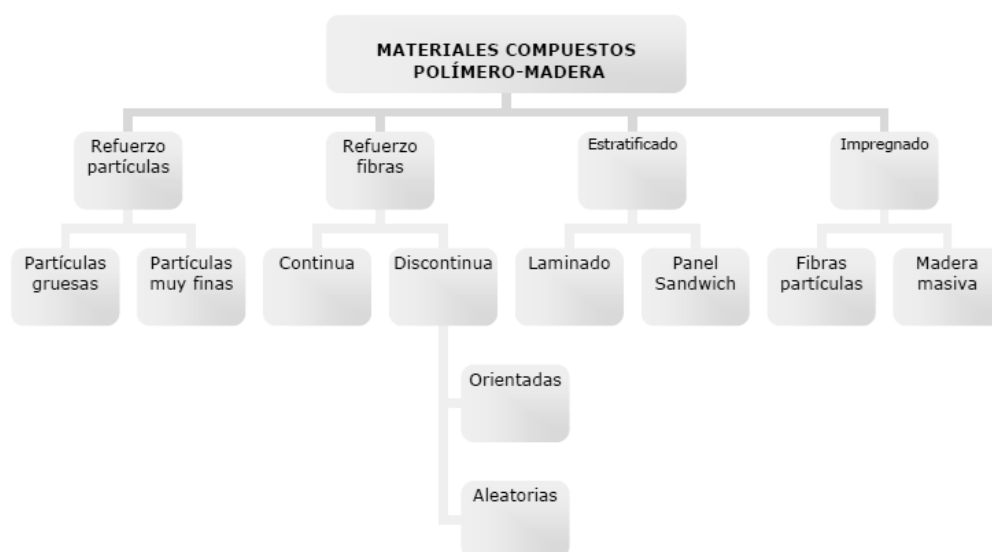


Figura 1.3: Clasificación de los materiales compuestos madera-plástico WPC [4]

Para el presente estudio se ha centrado en los materiales compuestos reforzados de residuos de madera (Refuerzo partículas) y una matriz termoplástica. La familia de los termoplásticos presenta características positivas para el desarrollo de este estudio, como es la alta productividad, de fácil procesabilidad, y bajo coste, en la mayoría de sus aplicaciones se modifican sus propiedades mediante la adición de cargas y fibras que actúen como refuerzo con el objetivo de mejorar limitadas propiedades y características.

1.8.3 Bases Teóricas

1.8.3.1 Celulosa

La celulosa es un polímero orgánico natural biodegradable, es un polímero de condensación lineal, constituido por unidades de glucosa [28]. Es el más abundante en el mundo y una fuente renovable importante amigable con el medio ambiente. El compuesto mayoritario de la madera es la celulosa que generalmente ocupa aproximadamente el 50 % de su peso seco, este dato variara según el tipo de madera que se utilice. La unidad estructural de la celulosa es la celobiosa (un disacárido) cuya estructura se observa en la figura 1.4.

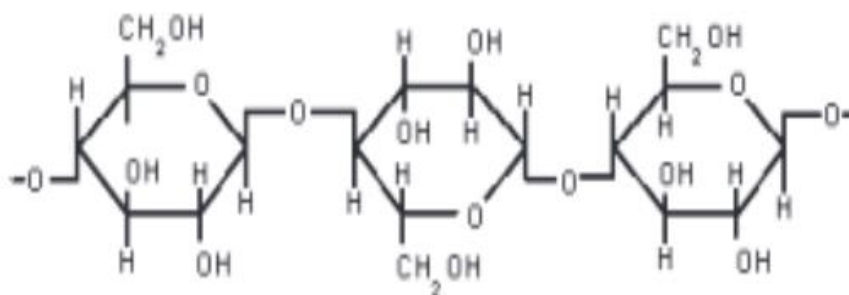


Figura 1.4: Molécula de la celulosa [29]

Las moléculas de la celulosa están orientadas longitudinalmente conformando una forma cristalina fuertemente ordenada, las moléculas de celulosa no están unidas covalentemente, estabilizándose su estructura solamente por puentes de hidrógeno aunque son muy débiles individualmente, su elevado número hace del material de celulosa una estructura muy firme y resistente. En la tabla 1.5. Se muestra las ventajas y desventajas del efecto de la celulosa en el material compuesto de madera-plástico.

Tabla 1.5: Características de la celulosa en la madera [29]

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Posee gran capacidad de absorber humedad	Tiene baja resiliencia
Soporta altas temperaturas	Resistencia moderada a la luz solar
Tiene baja densidad	Es susceptible a daños por ácidos vegetales y Orgánicos
	Posee una alta flamabilidad

1.8.3.2 Hemicelulosa

La hemicelulosa también conocida como las poliosas son heteropolisacáridos de alta masa molar que se encuentran constituidos por diferentes unidades de monosacáridos. Está presente en las paredes celulares del material y se encuentran en forma amorfa, también presenta características importantes como la conformación de azúcares con unión similar a la de la celulosa [18].

Las hemicelulosas son carbohidratos que pueden dar origen a la formación de hongos en el material compuesto, por esto se debe lograr una cobertura completa de la partícula de madera evitando las condiciones de humedad.

1.8.3.3 Lignina

Las ligninas son fracciones de la madera libre de extraíbles extremadamente complejas y difíciles de caracterizar de polímeros hidrocarbonados. Se forma por la deshidratación de los azúcares que generan estructuras aromáticas. Es una molécula grande y ramificada que no posee estructura de polisacárido, esta proporciona soporte estructural a la planta, haciéndola resistente al impacto, compresión y flexión[11].

1.8.3.4 Obtención de residuos de madera

Los residuos de madera generados por las diferentes actividades industriales son una de las mayores fuentes de impacto ambiental. Los residuos de madera se componen de recortes de madera, astilla, aserrín, viruta, envases, embalajes, muebles, puertas, tablones, ramas, etc. Se generan principalmente en el sector industrial de procesamiento de la madera.

La industria maderera en el Ecuador genera grandes cantidades de aserrín (sawdust) que no son utilizados para un fin específico (por lo que será motivo de este estudio), esto indica que

el aserrín es enviado a los rellenos sanitarios o se lo quema generando contaminación ambiental.

1.8.3.5 Sawdust/Aserrín (polvo de madera)

El sawdust/aserrín se define como la especie de polvo, más o menos grueso, que se desprende de la madera cuando es procesada, por este motivo las propiedades químicas del aserrín se asumen como la composición química de la madera[30].

El sawdust/aserrín obtenido como residuo o desecho de madera, por el proceso de aserrío o corte es el más importante en volumen dependiendo de la demanda del producto.

En la tabla 1.6 se muestra las principales ventajas y desventajas del empleo de la madera como relleno en matrices poliméricas.

Tabla 1.6: Principales ventajas y desventajas del empleo del sawdust/aserrín [29]

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Son muy resistentes	Termoplásticos de baja temperatura de fusión
Tienen bajo peso específico	Tienen baja estabilidad dimensional
Son recursos renovables	Tienen baja resistencia a microorganismos
Son biodegradables	Tienen baja temperatura de procesado
Costos bajos, económicas	

Los residuos en forma de sawdust/aserrín se caracterizan por su bajo coste y baja densidad, también son biodegradables y no abrasivos. No obstante, presentan limitaciones por su tendencia a formar agregados durante el procesado y su alta absorción de humedad, lo cual limita su empleo como refuerzo.

1.8.4 Aspectos Ambientales

Desde los años 70 se han visto grandes esfuerzos por parte del sector industrial para desarrollar compuestos termoplásticos con residuos de madera que sean más amigables con el medio ambiente. Sin embargo en Ecuador han sido llevados a cabo muy pocos proyectos enfocados en este sentido, pese a que Ecuador se ha caracterizado por su producción agrícola y maderera.

Este tipo de residuos generan y acumulan polvo en el aire que causa la emisión de dióxido de carbono a la atmósfera, y perjudican la salud de los trabajadores y de los habitantes de zonas

cercanas a los aserraderos, a la vez que suponen otros problemas ambientales por incendios y auto combustión y la propagación de plagas y enfermedades [31].

Los impactos negativos que generan al medio ambiente por degradación de los bosques naturales debido al uso de los recursos ligníferos para ser utilizadas como materias primas por las fábricas ha causado graves problemas en la erosión del suelo.

Los desechos industriales de la industria ecuatoriana maderera que han cumplido su ciclo de vida ha generado un problema por no saber cómo disponer del desecho. En este estudio se presenta una nueva alternativa para la reducción de materia virgen y por otro lado reducción del uso de termoplásticos como el polipropileno que son derivados del petróleo, con la implementación de materiales WPC. En investigaciones previas [9] [32] [33] se reportan resultados prometedores a la reducción en materia ambiental.

1.8.5 Matriz Polimérica

Un compuesto con matriz polimérica es un material compuesto que consiste en un polímero incorporado a una fase de refuerzo como fibras o polvos[14].

La principal función que cumple una matriz polimérica es la transmisión de los esfuerzos al material de refuerzo (material particulado sawdust), por medio de la interfase, que es el límite entre la fibra y la matriz, también protege al material de refuerzo de esfuerzos de compresión, humedad, ataques químicos etc.

Los materiales poliméricos poseen buenas propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión y facilidad de procesamiento una matriz polimérica puede ser termoplástica o termoestable que se estudiarán a continuación.

1.8.5.1 Matriz polimérica termoestable

Los materiales compuestos termoestables están formados por una matriz polimérica que se endurece bajo la acción del calor y presión, y por el material particulado que actúa como refuerzo.

Las resinas termoestables son aquellas que sufren una serie de reacciones químicas llamadas de curado o reticulación. Es rígida y no fluye por efecto de la temperatura, pero a elevadas temperaturas puede sufrir una degradación química estructural, es decir, una vez conformado este tipo de compuesto ya no se puede remodelar o ablandar ya que su endurecimiento es

irreversible por haber sufrido una modificación en su estructura química y a nivel molecular[34]. Los termoestables más usados como matriz son el poliéster, el epoxy y las poliamidas.

1.8.5.2 Matriz polimérica con materiales termoplásticos

Los materiales compuestos termoplásticos son aquellos en los que la matriz polimérica está formada por un polímero termoplástico, se caracterizan por poseer una alta relación entre resistencia/densidad, se funden al calentarse y se solidifican al enfriarse. Los termoplásticos pueden ser fundidos más de una vez, pero si se los funde en demasiadas ocasiones se puede causar degradación.

Los materiales termoplásticos ofrecen algunas ventajas en comparación con los materiales termoestables, entre estas está el bajo costo del procesamiento ya que presenta ciclos de moldeo cortos, las matrices termoplásticas generan materiales de baja densidad, también presentan buena resistencia al impacto, compresión y flexión y posee buena resistencia química y baja absorción de humedad. Los aspectos negativos de la utilización de termoplásticos son su tendencia a fluir a temperaturas elevadas y su alta viscosidad, que dificulta la interacción con el refuerzo [35].

El procesamiento de los compuestos termoplásticos básicamente se realiza utilizando técnicas de fusión como la extrusión y moldeo por inyección en las que se centrara esta investigación.

1.8.5.3 Materiales termoplásticos

Los materiales termoplásticos son los que se derivan de los monómeros lineales o ligeramente ramificados que forman un patrón básico de una cadena que se repite. Cuando se encuentra bajo el calor se reblandecen, y se solidifica por enfriamiento mediante la adopción de la forma deseada por lo que pueden ser procesados varias veces sin perder drásticamente sus propiedades, a diferencia de las resinas termoestables, casi no existe un cambio químico por lo tanto no altera mucho la forma del material. Los termoplásticos más utilizados hoy en día son el polietileno, polipropileno, poliuretano, policarbonato y los acrílicos.

En la actualidad existen varios tipos de termoplásticos y en cada uno de ellos varía la organización cristalina-amorfa y la densidad, En la Tabla 1.7 se muestran los tipos más conocidos y sus respectivas propiedades.

Tabla 1.7: Propiedades de los materiales termoplásticos [36]

Polímero	Densidad (g / m^3)	Resistencia a la Tracción (MPa)	Termoformado (°C)
Polietileno Tereftalato (PET)	1.30	47	120 -170
Polietileno de Alta densidad (PEAD)	0.95	28	130 - 205
Cloruro de polivinilo (PVC)	1.35	58	100 - 180
Polipropileno (PP)	0.90	30	150 - 195
Poliestireno (PS)	1.05	55	130 - 155

1.8.5.4 Polietileno de alta densidad como matriz Polimérica

El polietileno de alta densidad (PEAD) es una macromolécula formada por la unión de monómeros de etileno que posee átomos de carbono insaturados, es decir que están unidos por un doble enlace, al momento que el doble enlace se rompe forman dos sitios químicos activos que generan la reacción con otros monómeros de etileno. En la figura 1.5 se muestra la estructura del monómero del etileno y el polietileno

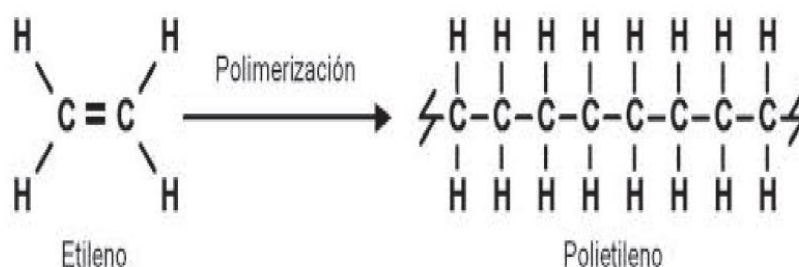


Figura 1.5: Estructura química del monómero de etileno [29]

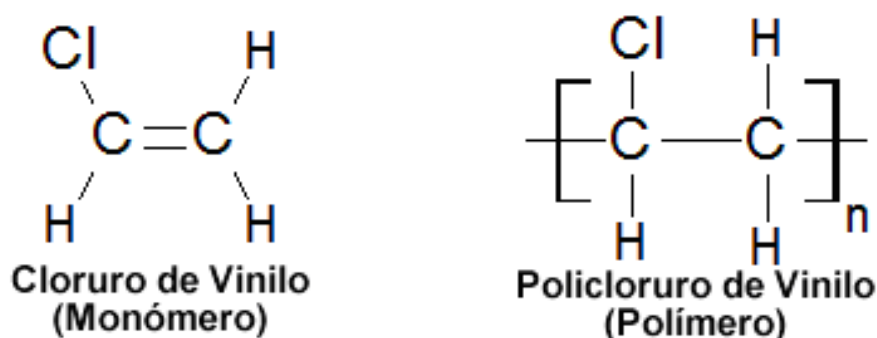
En el polietileno de alta densidad está compuesto por moléculas no ramificadas y con pocos defectos, por ello contienen un alto grado de cristalinidad, pero no es totalmente cristalino pues posee zonas amorfas. La relación entre las zonas amorfas y las cristalinas a mayor grado de cristalinidad mayor será la densidad. En la tabla 1.8 se presenta las propiedades más importantes del polietileno de alta densidad.

Tabla 1.8: Propiedades principales del polietileno de alta densidad [7]

Propiedades	Unidad	Valor
Densidad	g/cm ³	0,94 – 0,96
Cristalinidad	%	80 – 90
Alargamiento a la rotura	%	100 – 200
Dureza	(Shore)	60 – 70 D
Conductividad térmica	10 cal/s cm	11 – 12,5
Temperatura de fusión	°C	130 – 140
Extrusión	°C	170 – 220
Resistencia al Impacto	Pie-lb/plg	15 – 12
Resistencia ala tensión	lb/plg ² *10	31 -55
Resistencia a la flexión	lb/plg ² *10	1400

1.8.5.5 Polivinilo de Cloruro como matiz polimérica

El polivinilo de cloruro (PVC) es la resina que resulta de la polimerización del monómero de cloruro de vinilo a cloruro de polivinilo como se muestra en la figura 1.6 en estudios anteriores se considera como una de las más versátiles de los termoplásticos [36], a partir de ella se pueden obtener productos rígidos y flexibles debido a sus diferentes procesos de polimerización [7]. El PVC es de las resinas sintéticas más complejas de formular y difícil de procesar, ya que estos requieren de aditivos, plastificantes, estabilizantes etc. para poder moldearlos y transformarlos a un producto final determinado.

**Figura 1.6:** Estructura monómero y polímero del PVC [7]

Durante el procesamiento del PVC, la resina se degrada por medio del calor y trabajo, esto se presenta en forma de amarillamiento lo que genera bajas propiedades mecánicas y ópticas

del material, por lo que es necesario la adición de agentes estabilizadores, en la tabla 1.9 se muestran las propiedades mecánicas más relevantes del polivinilo de cloruro.

Tabla 1. 9: Propiedades Mecánicas del PVC [7]

Cargas de ruptura a la tracción	550 Kg / cm ²
Resistencia a la flexión	1100 Kg / cm ²
Resistencia a la compresión	800 Kg / cm ²
Módulo Elástico	30000 Kg / cm ²

1.8.5.6 Aditivos para resinas de polivinilo de cloruro

Para la fabricación de productos de PVC es necesaria una formulación de los materiales plásticos a partir de PVC, estas forman dos clases distintas de materiales, los materiales rígidos y los materiales flexibles, dependen de sus propiedades y aplicaciones. Para formularlos es muy importante el uso de agentes como plastificantes, estabilizadores, lubricantes, cargas, pigmentos etc.

1.8.5.7 Plastificantes

Los plastificantes son agentes que incorporadas a un material plástico aumenta su flexibilidad, por lo que reduce la viscosidad en el punto de fusión por lo que facilita su procesamiento, los plastificantes pueden estar en estado líquido o sólido con un alto punto de ebullición [37], esta propiedad es la que permite la flexibilidad de la resina mediante la acción de solvatación sobre la molécula lineal del polivinilo de cloruro produciendo una cierta debilidad en el enlace químico que se da por medio de Van Der Waals [7].

Para que un plastificante sea eficaz, debe ser mezclado e incorporado en la matriz de polímero PVC hasta que la resina se disuelve en el plastificante o el plastificante se disuelve en el material plastificado.

1.4.5.8 Estabilizadores

Es común que las resinas plásticas presentan un envejecimiento por degradación u oxidación que se produce por la temperatura y la presencia del aire o la luz, ya que las resinas entran forzosamente en contacto con el oxígeno durante el procesamiento, para evitar este problema es necesario adicionar estabilizadores para contrarrestar la degradación del

material, como es el caso del PVC que presenta cierta inestabilidad química debido a los rayos ultravioleta producidos por la luz solar [7].

Los agentes estabilizados más utilizados cuando se trabajan con resinas de polivinilo de cloruro en la industria son el carbonato de sodio, Estearatos de calcio difeniltiourea ortosilicato de plomo, entre otros.

1.8.6 Polietileno de baja densidad como matriz polimérica

El polietileno de baja densidad (PEBD) es un polímero formado a partir de la polimerización del monómero etileno, es un copolímero de etileno y de otro comonómero de α -olefina (buteno, hexeno, octeno) [38].

En un estudio [39] la resina de PEBD fueron extrudidos con respecto al contenido del material de refuerzo el cual presenta un comportamiento general característico de un sistema de percolación para materiales compuestos poliméricos a base de polianilina se notó un incremento súbito en la conductividad del extrudido con 1 % en peso de PANIPOL con respecto a la del PEBD. En la tabla 1.10 Se muestran las propiedades más importantes del PEBD.

Tabla 1. 10: Propiedades principales del polietileno de baja densidad [7]

Propiedades	Unidad	Valor
Densidad	---	0,92 – 0,93
Cristalinidad	%	60 – 65
Alargamiento a la rotura	%	500 – 725
Dureza	(Shore)	40 – 45 D
Conductividad térmica	10 cal/s cm	8
Temperatura de fusión	°C	110 – 115
Extrusión	°C	150 - 160
Resistencia al Impacto	Pie-lb/plg	16
Resistencia a la tensión	lb/plg ² *10	1 - 23
Resistencia a la flexión	lb/plg ² *10	---

1.8.7 Polipropileno como matriz Polimérica

El polipropileno (PP) es un termoplástico que pertenece al grupo de las poliolefinas y que se obtiene partir de la polimerización catalítica del propileno. El polipropileno es un polímero que puede ser utilizado como matriz debido a que es un material liviano y por la baja densidad, La unidad estructural repetida tiene un grupo metilo unido a uno de los carbonos como se muestra en la figura 1.7, es totalmente reciclable su incineración no tiene ningún efecto contaminante, y su tecnología de producción es la de menor impacto ambiental [16] [40].

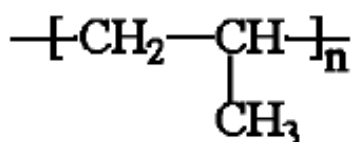


Figura 1.7: Estructura química del propileno [16]

1.8.7.1 Estructura del polipropileno

El polipropileno está formado estructuralmente por un polímero vinílico, similar al polietileno a diferencia que solo que uno de los carbonos de la unidad monomérica tiene unido un grupo metilo, como se muestra en la figura 1.7. La Tacticidad del polipropileno puede clasificarse en isotáctica, sindiotáctica y atáctica, dependiendo de si los grupos metílicos están colocados en el mismo lado de la cadena. Son las estructuras más ordenadas que le imprimen al polímero buenas características físicas siendo un polímero cristalino y el atactico presentan estructuras desordenadas o distribuidas al azar por lo que tiene propiedades menores. En la figura 1.8 se muestran los tipos de tacticidades del polipropileno.

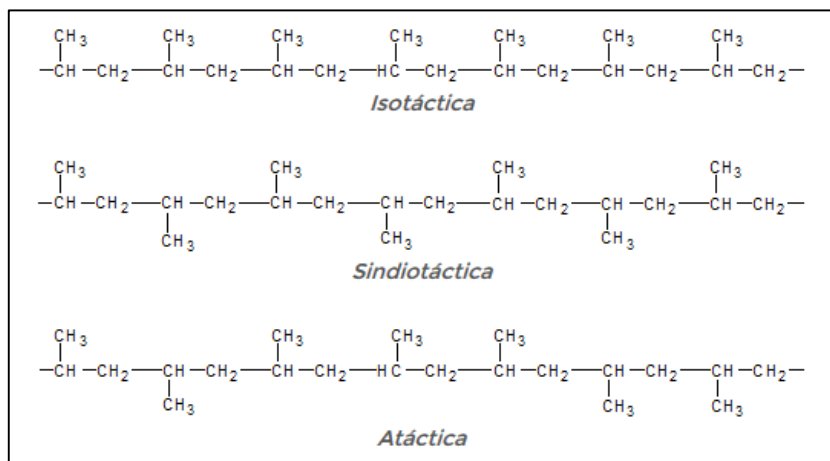


Figura 1. 8: Tipos de Tacticidad del polipropileno[40].

Siendo los procesos industriales más empleados para la fabricación de polipropileno isotáctico que es el que ha despertado mayor interés comercial [41].

1.8.7.2 Propiedades del Polipropileno

Los copolímeros de polipropileno son regularmente de propileno y etileno, donde el propileno está presente en su mayoría, generalmente superior al 75%. Este grado presenta una mayor resistencia a la fractura que el PP homopolímero, acompañado sin embargo, de una menor rigidez y resistencia mecánica[16].

Las propiedades físicas y mecánicas del polipropileno se ven afectadas en su mayor grado por la longitud de las cadenas del polímero (peso molecular), ya que un mayor peso molecular resulta en una mayor resistencia al impacto y en un mayor alargamiento del material. Es las tablas 1.11 y 1.12 se presentan las propiedades mecánicas y térmicas respectivamente.

Tabla 1. 11: Propiedades mecánicas del polipropileno [43].

Descripción	Homopolímero (PP)	Copolímero (PP)
Módulo elástico en tracción (GPa)	1,1 a 1,6	0,7 a 1,4
Alargamiento de rotura en tracción (%)	100 a 600	450 a 900
Carga de rotura en tracción (MPa)	31 a 42	28 a 38
Módulo de flexión (GPa)	1,19 a 1,75	0,42 a 1,40
Resistencia al impacto Charpy (kJ/m2)	4 a 20	9 a 40
Dureza Shore D	72 a 74	67 a 73

Tabla 1. 12: Propiedades Térmicas del polipropileno [43].

Descripción	Homopolímero (PP)	Copolímero (PP)
Temperatura de fusión (°C)	160 a 170	130 a 168
Temperatura máxima de uso continuo (°C)	100	100
Temperatura de transición vítrea (°C)	-10	-20

1.9 Aplicaciones de los compuestos WPC

Existen diversas aplicaciones que se pueden dar a las fibras naturales y a los materiales compuestos WPC que en los últimos años ha surgido con mucha fuerza y están llamados a sustituir a los materiales convencionales como la madera sobre todo en el área automotriz y

de la construcción como se puede ver en la figura 1.9 La demanda del uso de estos materiales [10] [40].

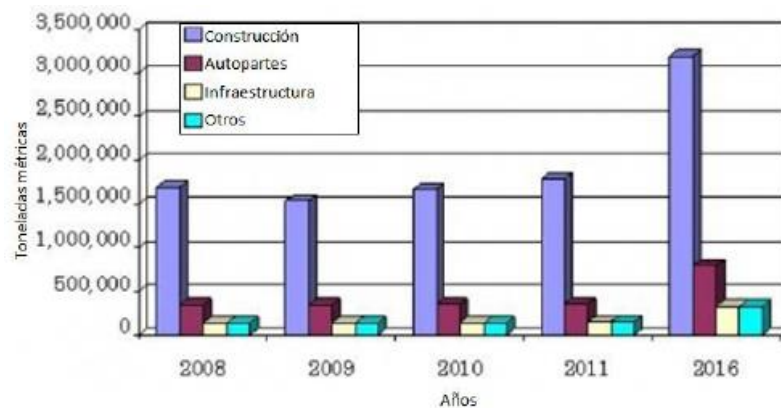


Figura 1.9: Demanda de compuestos de madera plástica [10]

Una de las mayores aplicaciones de este tipo de materiales se da en el recubrimiento de superficies que se encuentran a la intemperie, siendo ampliamente utilizados en muelles, terrazas, y otras superficies cerca de piscinas etc. Las ventajas inherentes que presentan para estas aplicaciones radican en una mayor resistencia a la y buenas propiedades físicas.

Un uso muy común de los plásticos reforzados con madera es en la fabricación de perfiles extruidos. Son ampliamente utilizados en el área de la construcción, estos perfiles se pueden utilizar para la fabricación de perfiles para puertas y ventanas, en el caso de la fabricación de perfiles, se ha comenzado a explorar la posibilidad de hacer perfiles espumados para ser utilizados en el interior. Aunque ya algunos fabricantes han implementado este proceso por las ventajas que presenta en el ahorro de costos de materia prima y disminución en peso.

Los materiales reforzados con madera también han ingresado en la industria automotriz ya que continuamente se busca disminuir costos y pesos en el vehículo y con buenos acabados como son los paneles interiores de puertas, espaldares de asientos, apoya-cabezas, guardafangos, bandejas para guardar objetos etc.

1.10 Conclusiones

En la investigación se demuestra que las fibras naturales y residuos de madera como la harina de madera poseen un gran potencial y una gran demanda para formular materiales compuestos.

Los residuos de madera a partir del sawdust contienen grandes ventajas y propiedades como la biodegradabilidad baja densidad, ventajas que representan ahorros de costos que generan gran atracción industrias de la construcción en mayor medida, en la industria automotriz.

Los materiales compuestos con matrices termoplásticas refuerzos con fibras naturales de madera son muy amigables con el medio ambiente y mejoran algunas propiedades como la flexión, módulo de Elasticidad de la madera lo que genera que cada vez más se sustituya a fibras no naturales o la misma madera.

CAPITULO 2

2. CARACTERIZACIÓN Y OBTENCIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS POLIMÉRICOS A PARTIR DEL SAWDUST

Introducción

Este capítulo tiene como objetivo la experimentación y procesamiento para la obtención de un nuevo material compuesto de madera plástica WPC a partir de sawdust como refuerzo, con distintas resinas termoplásticas que actuarán como matriz. Se determinará la composición y los parámetros de procesamiento, para encontrar el mejor resultado y las mejores propiedades, tanto físicas como mecánicas del material compuesto. Los procesos fueron realizados en los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca y en la Fábrica de Consulplast S.A. ubicada en la misma ciudad.

2.1 Obtención de la materia prima a partir del sawdust

Los materiales lignocelulósicos empleados fueron el eucalipto y el pino que poseen grandes reservas en el Ecuador. Estos fueron recolectados de un aserradero en la ciudad de Cuenca de forma limpia sin ser mezcladas con otros residuos madereros o impurezas, de esta manera se garantiza la pureza de la madera antes de ser procesado. En la tabla 2.1 se muestran la composición química de estas especies forestales. Se observa que el contenido de celulosa de las composiciones es alto y muy favorable para las propiedades mecánicas de los materiales compuestos.

Tabla 2.1: Composición química del eucalipto y Pino [8]

Especie Forestal	Densidad (gr/cm³)	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)
Eucalipto	0,55 - 0,815	41 – 48	14 - 24	18 – 30
Pino	0,40 - 0,6	37,88 - 48,75	14 - 28	28 - 29,51

2.2 Resinas termoplásticas

Para este proyecto se utilizaron distintas resinas termoplásticas como el polietileno de alta densidad (PEAD), polivinilo de cloruro (PVC), polietileno de baja densidad (PEBD), y el Polipropileno (PP) que se describen a continuación.

2.2.1 Polietileno de alta densidad

En este estudio se empleó la resina Braskem HA 7260, es un polietileno de alta densidad diseñado para el moldeo por inyección, posee buena fluidez y fácil procesabilidad combinadas con alta rigidez y dureza. En la tabla 2.2 Se describen sus principales propiedades.

Tabla 2. 2: Principales propiedades del PEAD Braskem HA 7260 [44]

Descripción	Método ASTM	Unidad	Valor
Índice de fluidez (190/2,16)	D 1238	g/10 min	20
Densidad	D 792	g/cm ³	0,955
Elongación en el punto de fluencia	D 638	%	7,2
Módulo de flexión, secante al 1%	D 790	MPa	1150
Dureza Shore D	D 2240	---	60
Resistencia al impacto Izod	D 256	J/m	20
Temperatura de ablandamiento Vicat a 10 N	D 1525	°C	121
Temperatura de deflexión térmica a 0,455 MPa	D 648	°C	67

2.2.2 Polivinilo de cloruro

En este estudio se utilizó la resina PVC – 500 provisto por Mexichem Resinas Colombia S.A.S. Es una resina de policloruro de vinilo tipo homopolímero elaborada por el proceso de polimerización en suspensión, posee un alto peso molecular, una alta absorción de plastificante, es muy recomendado para la elaboración de artículos flexibles. En la tabla 2.3 Se muestran las principales propiedades según el proveedor.

Tabla 2.3: Propiedades del PVC – 500. Mexichem Resinas Colombia S.A.S.(Consulplast)

Propiedades	Norma	Valor
Apariencia	---	Polvo blanco
Valor K	DIN 53726	70 ± 1
Viscosidad inherente	ASTM D 1243	0,96 – 1,02
Densidad aparente g./l. (Método A)	ATM D 1895	450 min.
Absorción de plastificantes, phr	ASTM D 3367	30 min
Distribución del tamaño de partícula,	ASTM D 1921	10 min. – 6 max.
Volátiles	ASTM D 3030	0,5 max.
Contenido de MVC residual, ppm	ASTM D 3749	1 max

2.2.3 Polietileno de baja densidad

En esta parte del estudio se utilizó la resina de polietileno lineal de baja densidad SABIC LLDPE M500026, es un polímero con una baja densidad de grado de copolímero de polietileno lineal de alto flujo con una distribución de peso molecular estrecha. Esta resina es recomendada para el proceso de moldeo por inyección donde se requiere una alta aceptación de relleno, en combinación con un buen flujo, para ello las condiciones típicas de temperaturas para el material es 180 - 230 °C en la tabla 2.4 Se muestran las propiedades del LLDPE.

Tabla 2.4: Propiedades del LLDPE SABIC M500026 [45]

Propiedades	Método	Unidades	Valor
Índice de fluidez (MFR) a 190 ° C y 2,16 kg	ASTM D 1238	g/10 min	50
Densidad	ASTM D 1505	Kg/m³	926
Límite elástico	ASTM D 638	MPa	13
Resistencia a la rotura	ASTM D 638	MPa	12,4
Alargamiento a la rotura	ASTM D 638	%	120
Módulo secante al 1% de alargamiento	ASTM D 638	MPa	354
Resistencia al impacto Izod a 23 ° C	ASTM D 256	J/m	450
Dureza Shore D	ASTM D 2240	---	55
Temperatura de ablandamiento a 10 N (VS/AC	ASTM D 1525	°C	88
Temperatura de fragilidad	ASTM D 746	°C	< -75

2.2.4 Polipropileno

En este caso se empleó la resina de polipropileno SEETEC H1500, es un homo polipropileno que se utiliza para aplicaciones de moldeo por inyección utilizando el Spheripol procedimiento autorizado por Basell. Este grado está diseñado para ser procesado en un equipo de moldeo por inyección convencional y ofrece una alta rigidez, estabilidad al calor, resistencia al rayado y de alto brillo de la superficie. En la tabla 2.5 Se muestran las principales propiedades de este polímero.

Tabla 2.5: Propiedades del polipropileno SEETEC H1500 [46]

Propiedades	Método	Unidad	Valor
Índice de fluidez	ASTM D 1238	g/10 min	12
Densidad	ASTM D 792	g /cm³	0,9
Esfuerzo de tracción (Rendimiento)	ASTM D 638	MPa	34
Deformación por tracción (rotura)	ASTM D 638	%	> 100
Módulo de flexión	ASTM D 790	MPa	1470
Dureza Rockwell	ASTM D 785	R	105
Resistencia al Impacto Izod (23 °C)	ASTM D 256	J/m	29
Temperatura de deformación por calor (4.6kgf / cm	ASTM D 648	°C	115

2.3 Proceso de obtención de la harina de madera a partir de sawdust

2.3.1 Flujograma del proceso de obtención de la harina a partir de sawdust

El proceso de obtención del polvo o la harina de madera a partir de sawdust se siguieron los procesos mostrados en la figura 2.1

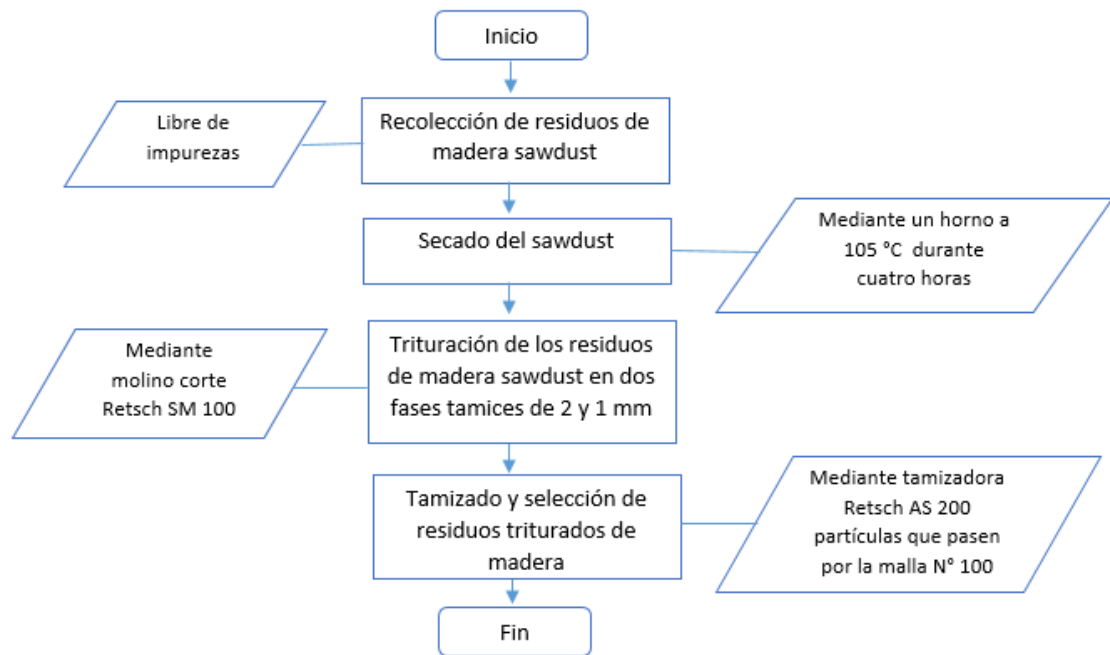


Figura 2.1: Flujograma de proceso de obtención de harina de madera

2.3.2 Recolección de residuos de madera sawdust

El primer paso para la obtención de partículas muy pequeñas de madera fue la recolección de residuos de eucalipto y de pino sin ser mezclados con otros residuos de madera o contaminantes y/o aditivos, esto se lo realizó en varios aserraderos en la ciudad de Cuenca, este presentaba una variedad de tamaños, En la figura 2.2 se muestran los residuos de madera recolectados y listos para ser procesados.



Figura 2.2 a: Residuos de madera de Eucalipto



Figura 2. 2 b: Residuos de madera de Pino

2.3.3 Proceso de secado del sawdust

El material recolectado se procedió a secar en un horno Memmert UN 110, como se muestra en la figura 2.3. Durante cuatro horas a 105 °C, para reducir el porcentaje de la humedad a menos del 2%, condición que se requiere para el posterior procesamiento.



Figura 2.3: Horno Memmert UN 110

2.3.4 Proceso de trituración de los residuos de madera sawdust

Para triturar los residuos de madera se empleó un molino de corte Retsch SM 100 como se muestra en la figura 2.4. Este proceso se lo realizó en dos fases, primero por el tamiz de 2mm para obtener partículas reducidas del material. Luego por el tamiz de 1mm para obtener la granulometría deseada.



Figura 2.4: Molino de corte Retsch SM 100

2.3.5 Proceso de selección de tamaños de los residuos de madera sawdust

El equipo empleado para este proceso fue una tamizadora Retsch AS 200 como se muestra en la figura 2.5 según, la norma ASTM E-11/95 para el proceso de selección de tamaños de las partículas de madera obtenidas en el molino de corte de la figura 2.4.



Figura 2.5: Tamizadora Retsch AS 200

2.3.6 Resultados de la selección de tamaños de los residuos de madera sawdust

Los porcentajes de las partículas de madera obtenidas se muestran en la tabla 2.6 donde se observa que la mayor parte se aloja en la malla N° 60 que esta sobre el 31- 40 %. Las partículas que se van a utilizar en este proyecto son los residuos que quedaron en la bandeja que son de un tamaño de 150 μm que esta sobre el 21 - 25 %, estos tamaños han sido utilizados como harina de madera en materiales compuestos de madera plástica WPC en estudios similares [23].

Tabla 2.6: Porcentajes del proceso de tamizado [autor]

Tamiz	Tamaño (μm)	Eucalipto (%)	Pino (%)
Malla N° 30	850	6,13	1,87
Malla N° 40	600	22,26	16,02
Malla N° 60	425	31,61	39,66
Malla N° 100	250	18,71	17,57
Harina de Madera	150	21,29	24,88

2.4 Proceso experimental y obtención del material compuesto

A continuación se describen las técnicas de procesamiento empleadas en este estudio para la obtención de pellets de materiales compuestos de distintas matrices poliméricas reforzados con harina de madera de eucalipto y pino basándose en normas ASTM, donde el proceso de obtención para la madera plásticas del polietileno de alta densidad, el polietileno de baja densidad y el polipropileno fueron similares, solo se diferenciaron en las condiciones de temperatura y la velocidad de giro del tornillo. Estas pruebas tuvieron lugar en los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana con sede Cuenca. Para el procesado y obtención de pellets del polivinilo de cloruro, se realizaron en la fábrica de plásticos Consulplast S.A. ubicado en Racar en la ciudad de Cuenca. El equipo que se empleó fue un molino mixer mezclador por fuerza centrífuga para mezclar la resina con los aditivos previos a la obtención de particulados.

2.4.1 Flujograma del proceso de extrusión y pelletizado

Para el proceso extrusión se siguieron las etapas mostradas en la figura 2.6

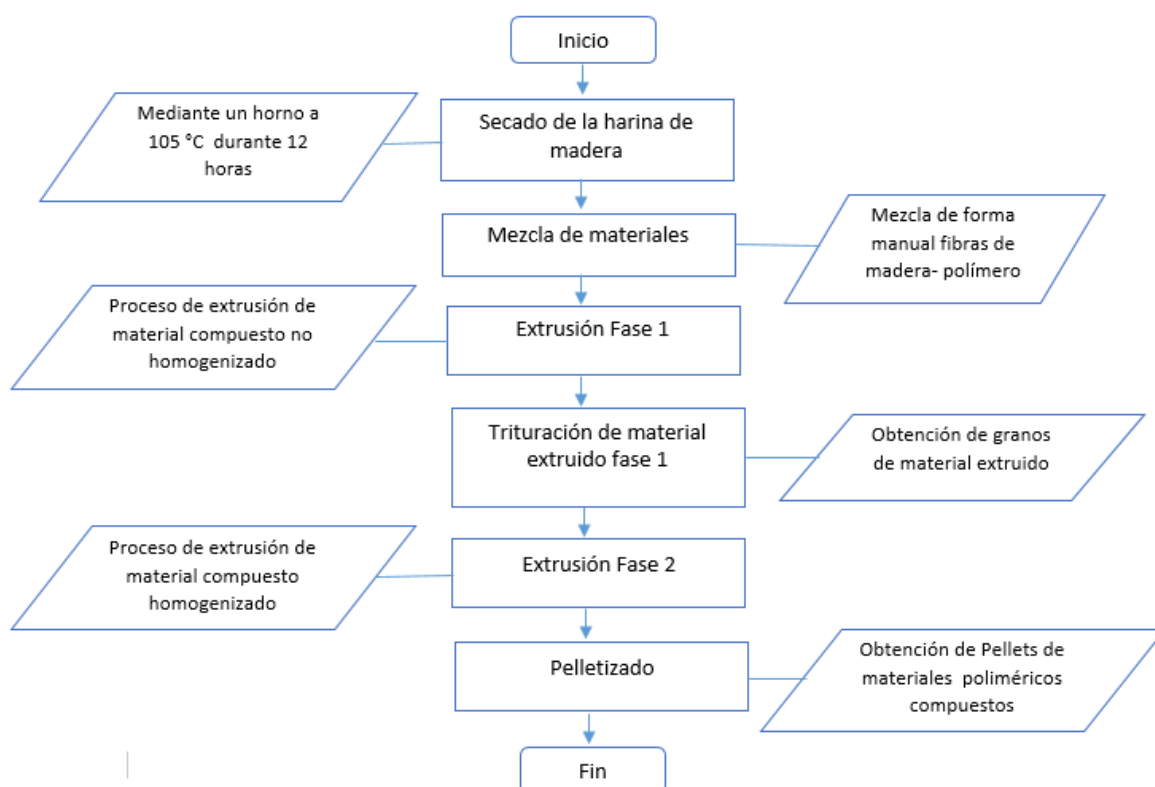


Figura 2.6: Flujograma de extrusión y pelletizado

2.4.2 Proceso de extrusión de la madera plástica WPC

El proceso de extrusión, es un proceso continuo para producir materiales semielaborados a partir de polímeros en forma de granza o polvo. En los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana cuenta con una extrusora Dr. Collin E - 20 T como se muestra en la figura 2.7 mediante la cual se logró obtener materiales con buenas mezclas para ser utilizado en posteriores procesos por moldeo para la obtención de probetas.



Figura 2.7: Extrusora Dr. Collin E-20 T

El proceso se ejecutó en dos fases de extrusión. La primera extrusión se realizó de la siguiente manera, en primer lugar, se procedió a secar el polvo o harina de madera en el horno Memmert UN 110 que se muestra en la figura 2.2 por un tiempo de 12 horas a 105 °C para garantizar que el contenido de humedad sea menor al 1 % y así garantizar que no exista vapor de agua que dificulte la unión fibra – matriz.

El siguiente paso fue pesar las materias primas por separado de manera que contengan la formulación planteada en la tabla 2.7 como se muestra en la figura 2.8, utilizando la harina de madera de eucalipto o pino como refuerzo, con distintas resinas termoplásticas como matriz plástica con una concentración de anhídrido maleico (MAPP) como agente compatibilizante.



Figura 2.8 a: Pellets material termoplástico



Figura 2.8 b: Harina de madera de Eucalipto



Figura 2.8 c: Harina de madera de Pino



Figura 2.8 d: Anhídrido maleico MAPP

El mezclado se realizó de forma manual, el material se introdujo a la tolva que se encarga de alimentar a la extrusora con el material que se ha de transformar. El siguiente paso fue controlar la velocidad de giro del tornillo y las temperaturas de las zonas de la alimentación plastificación y dosificación, para ello se revisó las fichas técnicas de las materias primas recomendadas por el proveedor, adicionalmente se consultó con anteriores investigaciones similares. En la tabla 2.7 se presentan las formulaciones y las condiciones del proceso de extrusión para distintas composiciones.

Tabla 2.7: Formulaciones para el proceso de extrusión [autor]

Matriz	Refuerzo	Peso Matriz (%)	Peso refuerzo (%)	Aditivo (MAPP) (%)	Velocidad del tornillo (rpm)	Temperaturas de las Zonas			
						Zona 1 (°C)	Zona 2 (°C)	Zona 3 (°C)	Zona 4 (°C)
PEAD	Eucalipto	68	30	2	60	140	152	165	185
PEBD	Eucalipto	68	30	2	50	150	160	170	185
PP	Eucalipto	68	30	2	50	165	170	180	190
PP	Eucalipto	70	30	--	50	165	170	180	190
PP	Pino	68	30	2	50	165	170	180	190
PP	Pino	70	30	--	50	165	170	180	190

Previo a la segunda extrusión, se procedió a triturar el material extruido en la primera en un molino de cuchillas como se muestra en la figura 2.9. Con la segunda extrusión se garantiza la homogeneidad en la mezcla fibra-matriz. Se siguió el mismo de la primera extrusión.



Figura 2.9: Molino de cuchillas

El comportamiento entre distintas composiciones fue muy similar con, pequeñas diferencias debido a las propiedades que presenta cada material. En la tabla 2.8 se muestra el comportamiento de los materiales compuestos poliméricos.

Tabla 2. 8: Diámetros de perfiles extruidos de materiales compuestos [autor]

Matriz	Refuerzo	Peso Matriz (%)	Peso refuerzo (%)	Aditivo (MAPP) (%)	Velocidad del tornillo (rpm)	Diámetro de perfiles extruidos (mm)
PEAD	Eucalipto	68	30	2	60	2,7
PEBD	Eucalipto	68	30	2	50	2,25
PP	Eucalipto	68	30	2	50	3,25
PP	Eucalipto	70	30	--	50	3,25
PP	Pino	68	30	2	50	3
PP	Pino	70	30	--	50	3

En la figura 2.10 se puede observar los perfiles cilíndricos extruidos polietilenos de alta densidad y baja densidad se adiciono un 4% de pigmento rosado y rojo respectivamente.



Figura 2.10 a: Perfiles de PP+ Pino



Figura 2.10 b: Perfiles de PP+ Eucalipto



Figura 2.10 c: Perfiles de PEAD-4% pigmentado rosado



Figura 2. 10 d: Perfiles de PEBD-4% pigmentado rojo

Es recomendable no exceder los 200°C en las zonas de plastificación, con el fin de evitar que el sawdust pueda sufrir una degradación.

2.4.3 Obtención de pellets del compuesto WPC

Una vez obtenida la masa extruida en forma de perfiles cilíndricos como se muestran en la figura 2.10, se realizó el pelletizado, para ello se utilizó una pelletizadora Dr. Collin E-20 T que se muestra en la figura 2.11. El producto final se muestra en la figura 2.12



Figura 2. 11: Pelletizadora Dr. Collin E-20 T



Figura 2.12 a: Pellets de PP + Pino



Figura 2.12 b: Pellets de PP + Eucalipto



Figura 2.12 c: Pellets PEAD+4% pigmentado rosado



Figura 2. 12 d: Pellets PEBD+4% pigmentado rojo

2.4.4 Proceso de pelletizado del Polivinilo de cloruro

Para el procesamiento y obtención de particulados de polivinilo de cloruro (PVC), la resina previa al pelletizado debe ser sometida a una mezcla con distintos aditivos que generan las condiciones adecuadas para el procesamiento del PVC.

2.4.4.1 Formulación para el proceso de extrusión del PVC

Para las pruebas de formulación para procesos posteriores de transformación de polímeros se realizaron en la fábrica Consulplast S.A. ubicada en Racar de la ciudad de Cuenca. La formulación partió como referencia con una fórmula que se maneja en la fábrica para la extrusión de mangueras corrugadas, en función de las resinas y aditivos que se utilizan en la fábrica en la tabla 2.9 se detalla la formulación para la fabricación de mangueras corrugadas por extrusión.

Tabla 2.9: Formulación para extrusión (Consulplast)

Componentes	Descripción	Peso (Kg)	Porcentaje %
PVC – 500	Resina termoplástica	100	94,79
BC – 40	Estabilizador	4	3,79
Ácido Esteárico	Lubricante	0,5	0,47
Dióxido de Titanio	Blanqueador	1	0,95
Total		105,5	100 %

Partiendo de esta formulación e insumos que cuenta la empresa, adicionalmente con consultas e investigaciones para procesamiento de fibras o harina de madera como refuerzo y resina PVC como matriz. Se empleó la siguiente formulación que se muestra en la tabla 2.10

Tabla 2.10: Formulación para procesos de transformación de plásticos [autor]

Componentes	Phr (Kg)	Porcentaje (%)
Resina PVC	100	85,04%
Harina de Madera (Eucalipto)	10,604	9,02%
Ácido Esteárico	0,5	0,43%
Dióxido de Titanio (Blanco)	0,084	0,07%
BC – 40	4,4	3,74%
Carbonato de calcio	2	1,70%
Total	117,588	100,00%

2.4.4.2 Proceso y obtención de Pellets de madera plástica - PVC

Para el procesamiento en la mezcla de resina-aditivos se utilizó un molino tipo mixer como se muestra en la figura 2.13 que tiene la función de mezclar la resina con los aditivos y el refuerzo por medio de fuerza centrífuga. Las aspas de mezclado rotan a la capacidad del tanque fue de 50 Kg a 2200 rpm aproximadamente. Por la fricción se calienta hasta 160 °C, temperatura adecuada para que tenga una buena mezcla entre resina y aditivos, esto se da en un lapso de 25 minutos. El tiempo de enfriamiento fue alrededor de 15 minutos y la conformación del particulado se da de forma automática por succión mediante una bomba. El proceso total toma 30 minutos aproximadamente.



Figura 2.13: Molino mezclador centrifugo (Consulplast)

La secuencia de mezclado fue:

1. Resina PVC – 500 a una temperatura de 60 °C sus propiedades mecánicas se encuentran en la tabla 2.2
2. BC – 40 este es un estabilizador térmico que se da en la composición
3. Dióxido de titanio blanqueador
4. Carbonato de calcio que actúa como carga para abaratar costos de producción.
5. Harina de madera (eucalipto) que actuará como una carga
6. Finalmente se introduce el ácido esteárico que actúa como lubricante en la composición.

Como resultado de este proceso utilizando la formulación de la tabla 2.10, obtuvo un polvo muy fino como la misma harina de madera con una excelente mezcla resina – aditivos. En la figura 2.14 se observa el polvo resultante.

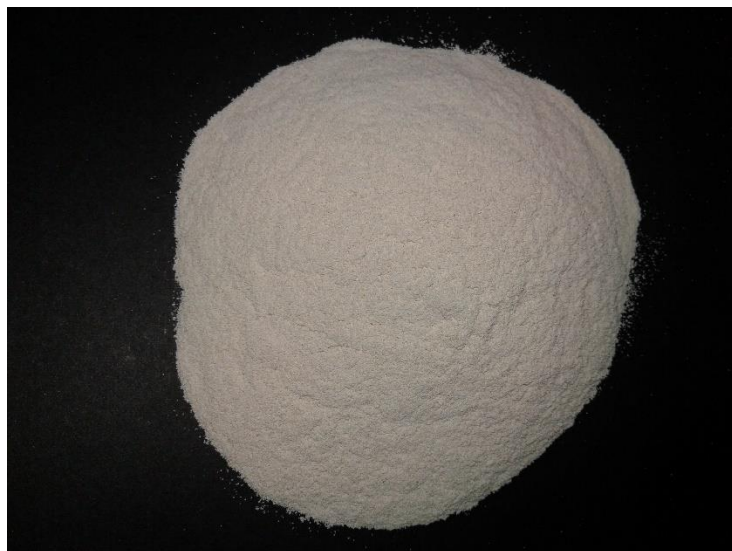


Figura 2. 14: *Polvo de compuestos PVC-Eucalipto*

2.5 Conclusiones

El procesamiento para la obtención de pellets por extrusión representa poca complejidad excepto en la primera extrusión donde el material compuesto tiene un bajo grado de mezcla entre la fibra y la matriz en consecuencia no se homogeniza bien.

El procesamiento por extrusión tiene un mejor comportamiento en el polipropileno con harina de madera de eucalipto como refuerzo comparando con el pino, debido a la diferencia de densidades ya que la fibra de pino ocupa más volumen que la fibra del eucalipto.

Con la presencia del aditivo anhídrido maleico MAPP en una concentración del 2 % mejora la fluidez del compuesto.

Para la obtención de pellets de polivinilo de cloruro con fibra de eucalipto es indispensable la granulometría del tamizado sea muy fina para que exista una buena adhesión entre la resina aditivos y fibra.

CAPITULO 3

3. ANÁLISIS DE LA INTERFASE Y ENERGÍA LIBRE SUPERFICIAL DE COMPUESTOS POLIMÉRICOS DE POLIPROPILENO Y POLIVINILO DE CLORURO CON FIBRAS DE MADERA DE EUCALIPTO Y PINO

Introducción

En este capítulo se describe la parte experimental para la obtención de probetas encapsuladas mediante el método de compresión en caliente. El estudio se centró en los compuestos con matrices termoplásticas con base de polipropileno y polivinilo de cloruro, compuestos obtenidos en el capítulo anterior. En este capítulo también se realizan pruebas de ángulo de contacto para determinar la energía libre superficial de los compuestos poliméricos.

3.1 Experimentación realizada para la obtención de probetas encapsuladas

Para la parte experimental se realizó un moldeo por compresión en caliente. Para este proceso se utilizó un equipo diseñado para obtener probetas encapsuladas de fibra natural [42] como se muestra en la figura 3.1. Este equipo posee un molde que da como resultado unas probetas cilíndricas con un diámetro de 25 mm y un espesor entre 3 y 5 mm dimensiones que son requeridas para ensayos posteriores.



Figura 3.1: Equipo de Compresión en caliente

Los materiales utilizados fueron los compuestos con matrices termoplásticas de polipropileno (PP) y polivinilo de cloruro (PVC) actuando como refuerzo la harina de madera de eucalipto y pino. Los materiales compuestos se introducen en forma de pellets o polvo como se muestran en las figuras 2.12 y 2.14 para el procesamiento de compactación del polipropileno y el polivinilo de cloruro respectivamente.

3.2 Procedimiento para la obtención de probetas encapsuladas por compresión en caliente

El proceso para la obtención de probetas compactadas mediante compresión en caliente o termocompresión se considerará como punto de referencia una investigación anterior utilizando el mismo equipo para la obtención de probetas compactadas de fibra natural [42]. En la figura 3.2 se muestra un diagrama de procedimientos para la obtención de probetas encapsuladas.

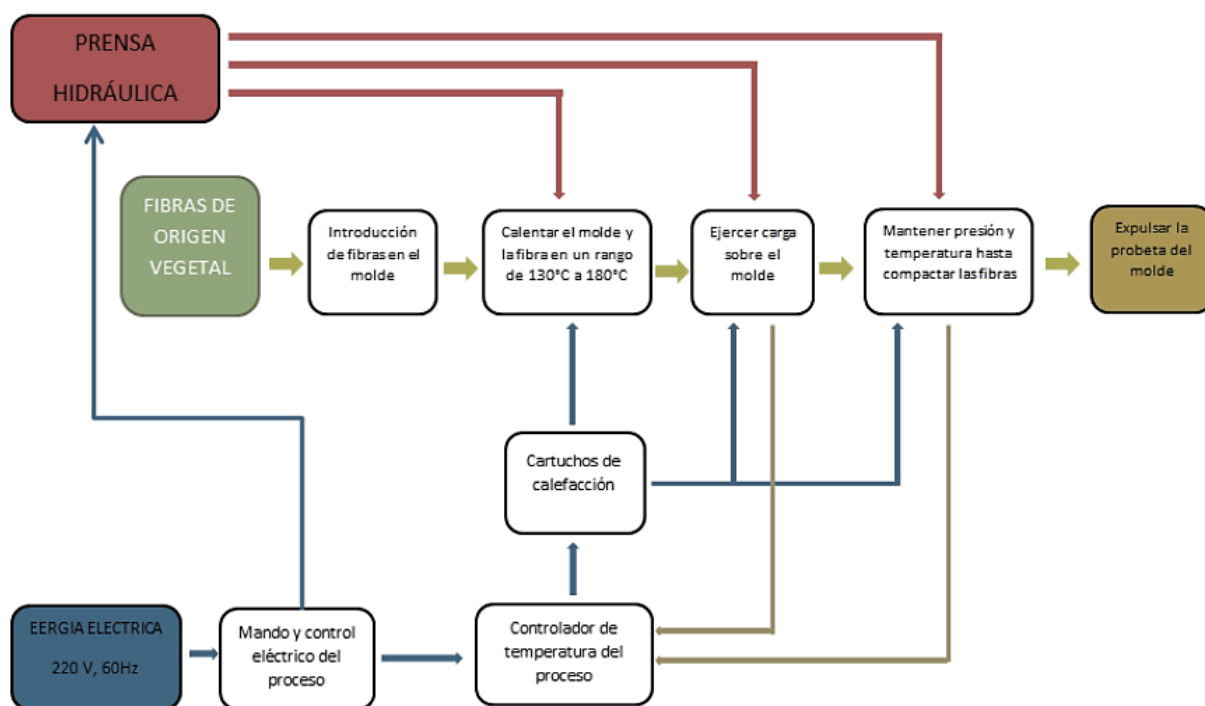


Figura 3.2: Diagrama de procedimientos para la obtención de probetas encapsuladas [42]

Para el objetivo de este capítulo la compactación de probetas de polipropileno y polivinilo de cloruro con harina de madera de eucalipto y pino como refuerzo, se contará con los equipos que satisfagan con las necesidades para garantizar la compactación de probetas a continuación se detallan los procesos y equipos utilizados.

3.2.1 Equipo para la compactación de probetas

El funcionamiento de este equipo es calentado por dos niquelinas en forma de cartuchos de 150 watts mediante un sistema de calefacción eléctrica alimentada por 220 voltios, como se muestra en la figura 3.3 con dimensiones de 3/8 X 80 mm.

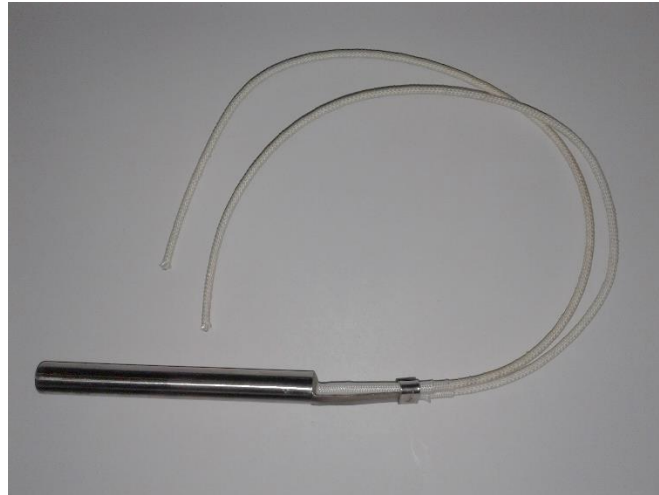


Figura 3.3: Cartuchos de calefacción

La temperatura es controlada por un sensor de temperatura llamada termocupla tipo J ubicada en el interior del molde que emite una señal hacia un controlador de temperatura CAMSCO TC-72N que cumple la función de controlar los cartuchos de calefacción por medio de un estado ON/OFF dependiendo la temperatura a controlar. En la figura 3.4 se muestra el sistema controlador de temperatura utilizado.



Figura 3.4: Controlador de temperatura CAMSCO TC-72N

Para la compactación de probetas es necesario aplicar una presión constante sobre el punzón, para ello se utilizó una prensa hidráulica que tiene la ventaja de poder controlar parámetros como la fuerza aplicada y la carrera longitudinal entre mordazas de la prensa hidráulica como se muestra en la figura 3.5, se alcanzan presiones hasta 27 Kg/cm²



Figura 3.5: Prensa Hidráulica

3.2.2 Obtención de probetas encapsuladas por compresión en caliente

El proceso para la obtención de probetas compactas con materiales compuestos de resinas termoplásticas utilizando la harina de madera a partir del sawdust como material de refuerzo se siguió el procedimiento planteado en la figura 3.2. El primer paso fue pesar los materiales compuestos en forma de pellets granulado y polvo para el compuesto de polipropileno y polivinilo de cloruro como se muestran en las figuras 2.12 y 2.14 respectivamente. Los pesos varían entre 1.1 gramos para los pellets granulados y 1.3 gramos para los pellets en forma de polvo, condición para obtener probetas de un espesor de 2-3 mm. Para ello se utilizó una balanza electrónica digital como se muestra en la figura a figura 3.6



Figura 3.6: Balanza electrónica modelo 20002 - 0,01g

Con la realización de diversas pruebas se definieron los parámetros para la obtención de probetas compactadas. En la tabla 3.1, se observan los parámetros requeridos para la compactación de estos compuestos.

Tabla 3.1: Parámetros para la compactación de probetas [autor]

Matriz	Refuerzo	Peso Matriz (%)	Peso Refuerzo (%)	MAPP (%)	Peso (gr)	Temperatura (°C)	Presión (Kgf/cm ²)	tiempo (min)
PP	Eucalipto	68	68	2	1,1	140	27	2
PP	Eucalipto	70	70	--	1,1	140	27	2
PP	Pino	68	68	2	1,2	140	27	2
PP	Pino	70	30	--	1,2	140	27	2
PVC	Eucalipto	85,04	9,02	--	1,3	140	27	2

3.2.3 Probetas encapsuladas de por compresión en caliente

Se obtuvieron cinco muestras de probetas por cada composición de la tabla 3.1, donde se obtuvieron resultados muy similares en la mezcla. Utilizando un microscopio de marca Olympus BX51M como se muestra en la figura 3.7 se pudo hacer el análisis de la compactación matriz- fibra de los distintos compuestos.

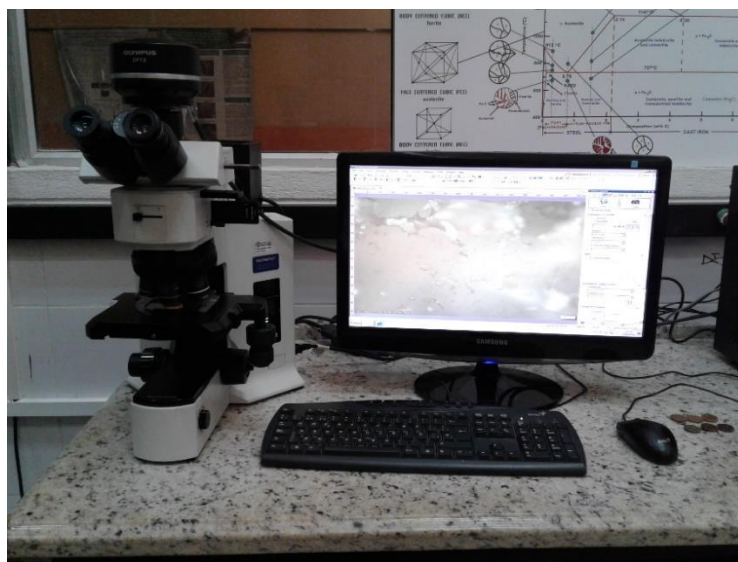


Figura 3.7: Microscopio Olympus BX51M

3.2.4 Análisis del polipropileno con eucalipto como refuerzo

3.2.4.1 Polipropileno con eucalipto como refuerzo

La muestra de la probeta de polipropileno con refuerzo de madera de eucalipto se muestra en la figura 3.8 se puede observar que posee una buena compactación entre matriz- fibra. Conserva un color oscuro características de la madera de eucalipto, presenta alta rigidez y un acabado superficial muy liso con una capa de brillo debido a la matriz plástica.

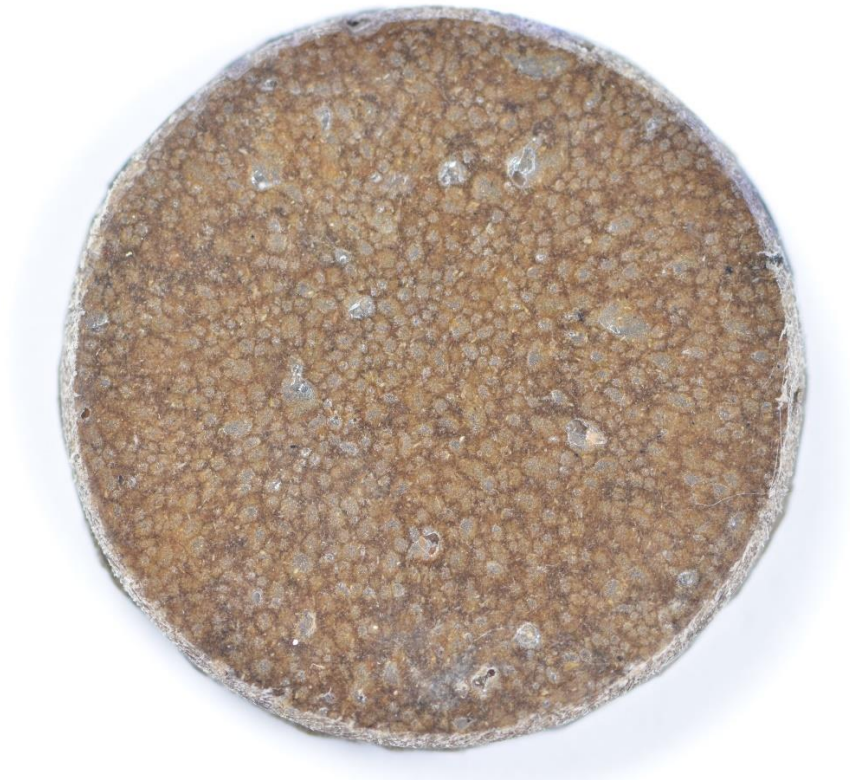


Figura 3.8: Probeta compactada de Polipropileno - Eucalipto

Por medio del microscopio de marca Olympus BX51M de la figura 3.7 se pudo calcular la rugosidad de la estructura superficial de la probeta como se muestra en la figura 3.9 utilizando una lente de microscopio de 10X / 0.30 BD



Figura 3.9: Imagen 10X / 0.30 BD de Polipropileno - Eucalipto

3.2.4.2 Polipropileno con eucalipto como refuerzo con MAPP

En este caso el polipropileno con eucalipto como refuerzo se le adiciono un 2% de aditivo anhídrido maleico MAPP. Los resultados a primera vista no varían en mucho con la diferencia que posee un tono más oscuro como se muestra en figura 3.10



Figura 3.10: Probeta compactada de Polipropileno – Eucalipto - MAPP

De la misma manera se utilizó el microscopio Olympus BX51M para realizar el cálculo de la rugosidad de la estructura superficial como se muestra en la figura 3.11 de esta manera se puede analizar cuanto influye el anhídrido maleico en la composición del compuesto.

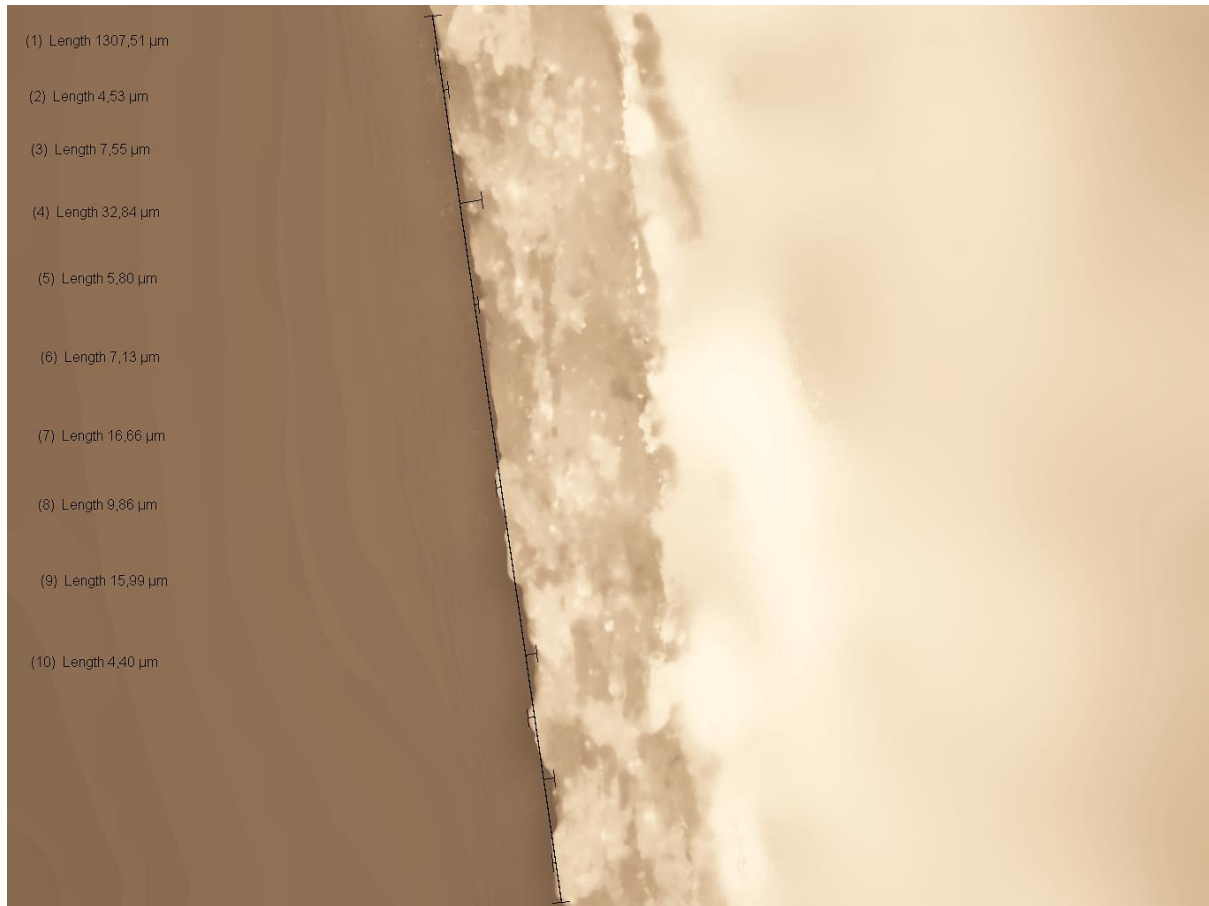


Figura 3.11: Imagen 10X / 0.30 BD de Polipropileno - Eucalipto -MAPP

3.2.5 Análisis del polipropileno con Pino como refuerzo

3.2.5.1 Polipropileno con Pino como refuerzo

El efecto en el caso del polipropileno con refuerzo de fibra de madera de pino tuvo un comportamiento muy similar que el compuesto del polipropileno con eucalipto, presenta una buena compactación y una mezcla homogénea, alta rigidez en el compuesto, tiene un color claro característica de la madera de pino como se puede observar en la figura 3.12



Figura 3.12: Probeta compactada de Polipropileno - Pino

Por medio del microscopio Olympus BX51M se pudo calcular la rugosidad de la estructura superficial del compuesto como e muestra en la figura 3.13 donde el tamaño de la lente del microscopio utilizado es de 10X / 0.30 BD.



Figura 3.13: Imagen 10 X / 0.30 BD de Polipropileno - Pino

3.2.5.2 Polipropileno con Pino como refuerzo con MAPP

Dentro de la composición del polipropileno con pino como refuerzo se le adiciono un 2% de aditivo anhídrido maleico MAPP. Haciendo una comparación en la que no se utilizó el aditivo MAPP se puede observar en la figura 3.14 que presenta un mejor acabado superficial con un color más claro y homogéneo.



Figura 3.14: Probeta compactada de Polipropileno - Pino - MAPP

También en la estructura superficial presenta mejoras con la presencia del 2% de anhídrido maleico MAPP en el compuesto de polipropileno con fibra de madera de pino donde la rugosidad obtenida se puede observar en la figura 3.15 por medio del microscopio Olympus BX51M utilizando la lente del microscopio de 10X / 0.30 BD.

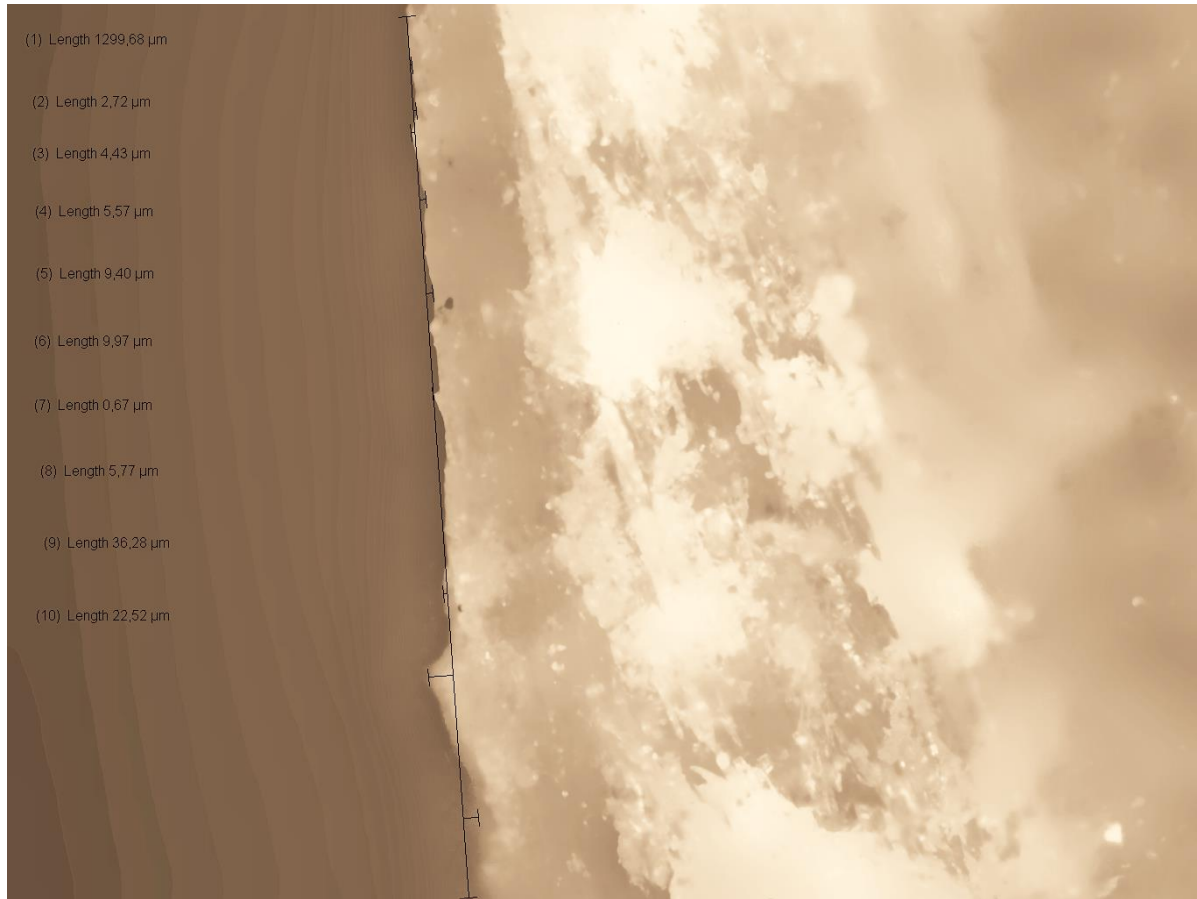


Figura 3. 15: Imagen 10 X / 0.30 BD de Polipropileno-Pino-MAPP

3.2.6 Análisis del polivinilo de cloruro con Eucalipto como refuerzo

La compactación de la probeta con el compuesto de polivinilo de cloruro con fibra de madera de eucalipto como refuerzo presenta buenas propiedades ópticas un muy buen color, una superficie muy lisa y homogénea, alta rigidez como se puede ver en la figura 3.16



Figura 3.16: Probeta compactada de Polivinilo de Cloruro - Eucalipto

Con la ayuda del microscopio Olympus BX51M se pudo calcular la rugosidad con una lente del microscopio de 10X / 0.30 BD como se muestra en la figura 3.17 a diferencia de los compuestos anteriores de polipropileno se puede ver un acabado superficial más brillante y una mejor adherencia entre fibra y matriz debido a varios aditivos que se manejan en la formulación.

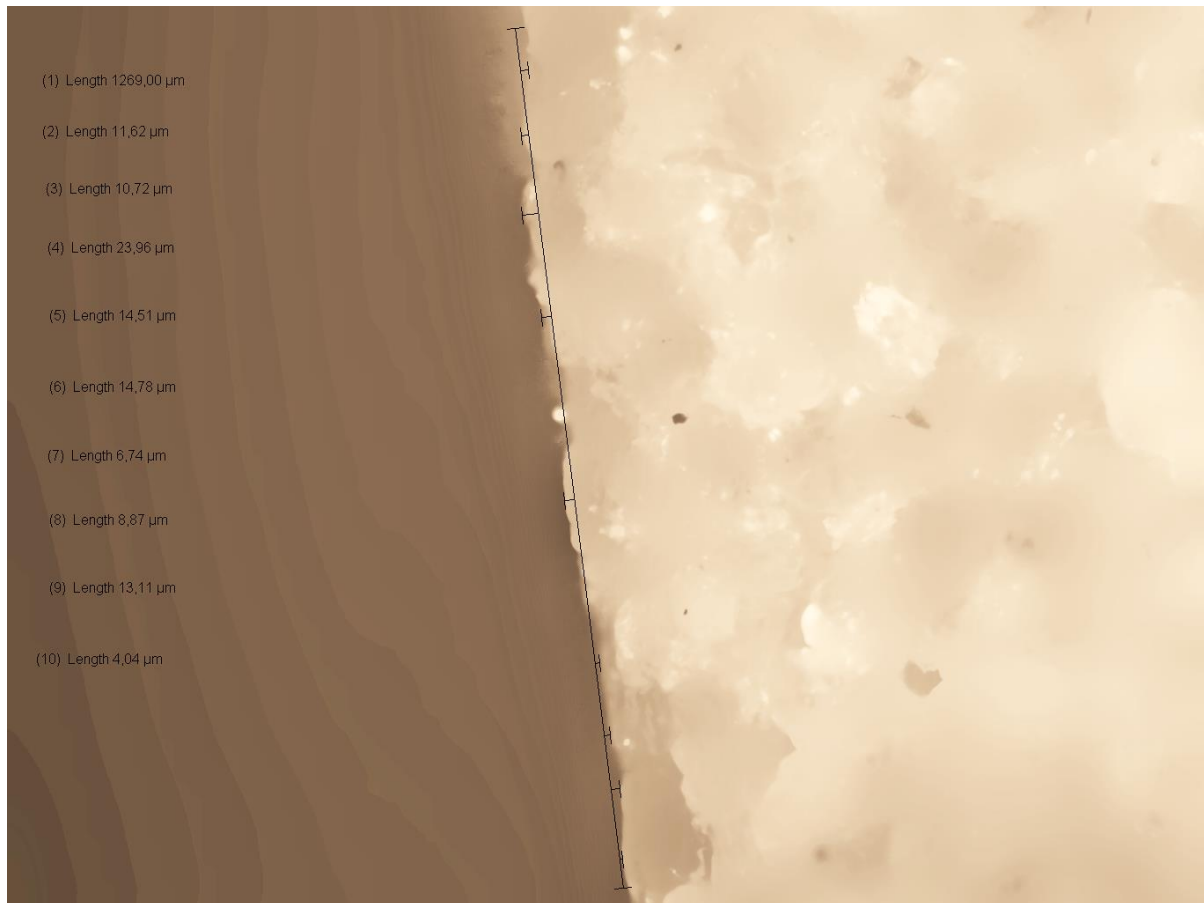


Figura 3.17: Imagen 10 X / 0.30 BD de Polivinilo de Cloruro - Eucalipto

3.2.7 Calculo de Rugosidades de los materiales compuestos poliméricos

Para el cálculo de la rugosidad en los materiales compuestos poliméricos se empleó el método de la rugosidad media aritmética que se define como la media aritmética de los valores absolutos de las coordenadas de los puntos del perfil de rugosidad en relación a la línea media dentro de la longitud de medición [43] [44]. En la figura 3.18 se observa los parámetros de rugosidad.

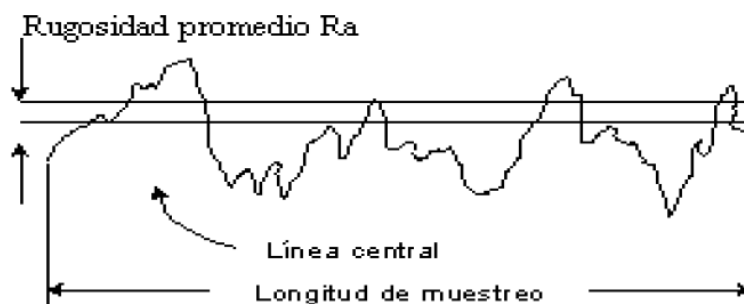


Figura 3.18: Parámetros de rugosidad [44]

Por medio de una aproximación se puede determinar el valor de rugosidad Ra mediante un cierto número de ordenadas. Para los materiales compuestos poliméricos se tomó un número de ordenadas de $n=9$ dada por la siguiente formula [43]:

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y|$$

Donde:

y = ordenada

n = número de ordenadas consideradas.

En la tabla 3.2 se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 3.2: Calculo de las rugosidades de los materiales compuestos poliméricos [autor]

Matriz	Refuerzo	Peso Matriz (%)	Peso Refuerzo (%)	MAPP (%)	Rugosidad (μm)
PP	Eucalipto	68	68	2	11,641
PP	Eucalipto	70	70	--	10,071
PP	Pino	68	68	2	10,814
PP	Pino	70	30	--	11,659
PVC	Eucalipto	85,04	9,02	--	12,037

3.3 Ángulo de contacto

El ángulo de contacto o humectabilidad es definida como la capacidad de adsorción de un líquido sobre una superficie sólida, como es el uso de materiales compuestos de fibra [45].

El ángulo de contacto (θ) es el ángulo formado entre la superficie sólida del sustrato y la línea tangente a la gota trazada en el límite de las tres fases, donde el líquido, sólido y gas interactúan [46]. En la figura 3.19 se puede observar el esquema del ángulo superficial (θ).

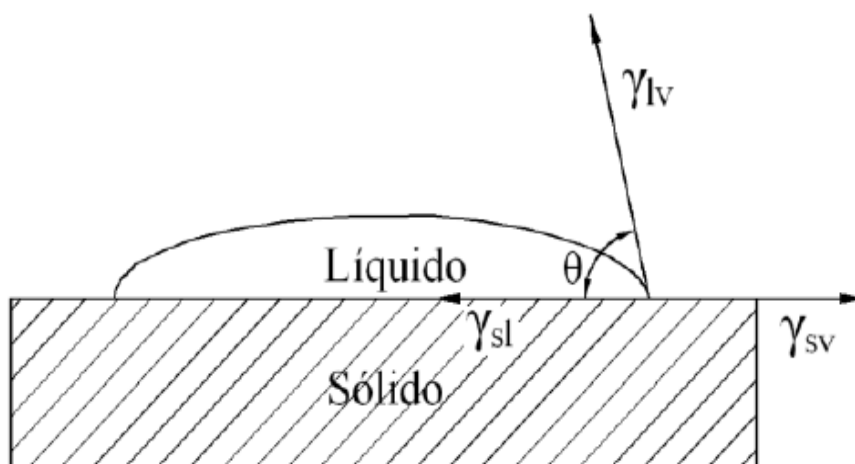


Figura 3.19: Esquema del ángulo de contacto [44]

El valor del ángulo θ de contacto entre la gota del químico líquido con una tensión superficial conocida y las fuerzas cohesivas del químico líquido provoca que la gota se contraiga adoptando una forma esférica [47]. Cuando el ángulo $\theta > 90^\circ$ el líquido no moja la superficie, si el ángulo $\theta < 90^\circ$ indica que el sólido es mojado por el líquido. Cuando θ tiene valores de 0° y 180° indica la mojabilidad completa y la no mojabilidad completa respectivamente [46]. El cálculo de la energía libre superficial se da por la suma de dos componentes dispersa (γ_s^d) y polar (γ_s^p) dada por la siguiente ecuación: [48]

$$\gamma_s = \gamma_s^p + \gamma_s^d$$

3.3.1 Método experimental

Las muestras utilizadas para este proceso eran las probetas compactadas de compuestos de polipropileno y polivinilo de cloruro con fibra de madera de eucalipto y pino como refuerzo. El equipo utilizado para obtener el cálculo del ángulo de contacto fue un goniómetro provisto por KSV modelo CAM 100 como se aprecia en la figura 3.20. El equipo posee un software de medición en base a la ecuación de Young-Laplace para el ajuste de la curva, el límite de las

muestras comprende un área de 150 mm de ancho x 150 mm de altura y una longitud indefinida. La fuente de luz se basa en un led, el ángulo de medición es de 180 grados con un margen de error ± 1 grado. Tiene un módulo de cámara de video de tecnología FireWire con una resolución de 640 x 480 pixeles y su lente óptico tiene una capacidad de 50 mm y un tubo de 40 mm de extensión.



Figura 3.20: Goniómetro KSV modelo CAM 100

Los químicos que se ocuparon para obtener la medición del ángulo de contacto fueron tres: agua desionizada, etilenglicol y diiodometano; estos dos últimos son provistos por la farmacéutica Merck. En la tabla 3.3 se muestran los componentes de la energía libre superficial en (mN/m) para los líquidos de ensayos.

Tabla 3.3: Componentes de la energía libre superficiales [44]

Líquido de Prueba	Energía de Superficie [γ]	Componente dispersivo [γ^d]	Componente polar [γ^p]
Agua desionizada	72.80	21.80	51.00
Etilenglicol	48.00	29.00	19.00
Diiodometano	50.80	50.80	0.00

3.3.2 Procedimiento experimental de obtención del ángulo de contacto superficial

Previo al procedimiento experimental se optó por limpiar con alcohol etílico con una concentración del 96 % a la superficie de la probeta donde se va a realizar el ensayo para garantizar que la superficie esté libre de impurezas que puedan afectar en los resultados.

Como primer paso se introdujo la probeta sobre la mesa del goniómetro y se calibro que la superficie de la probeta para que se encuentre paralela a la fuente de luz. En segunda estancia se depositó sobre la superficie de la probeta una gota de agua desionizada por medio de una jeringa.

Mediante la ejecución del software CAM 100 se procedió a realizar mediciones del ángulo de contacto, se realizaron cinco pruebas en distintos puntos de la superficie. En la figura 3.21 se muestra la ejecución de la prueba a través del software CAM 100

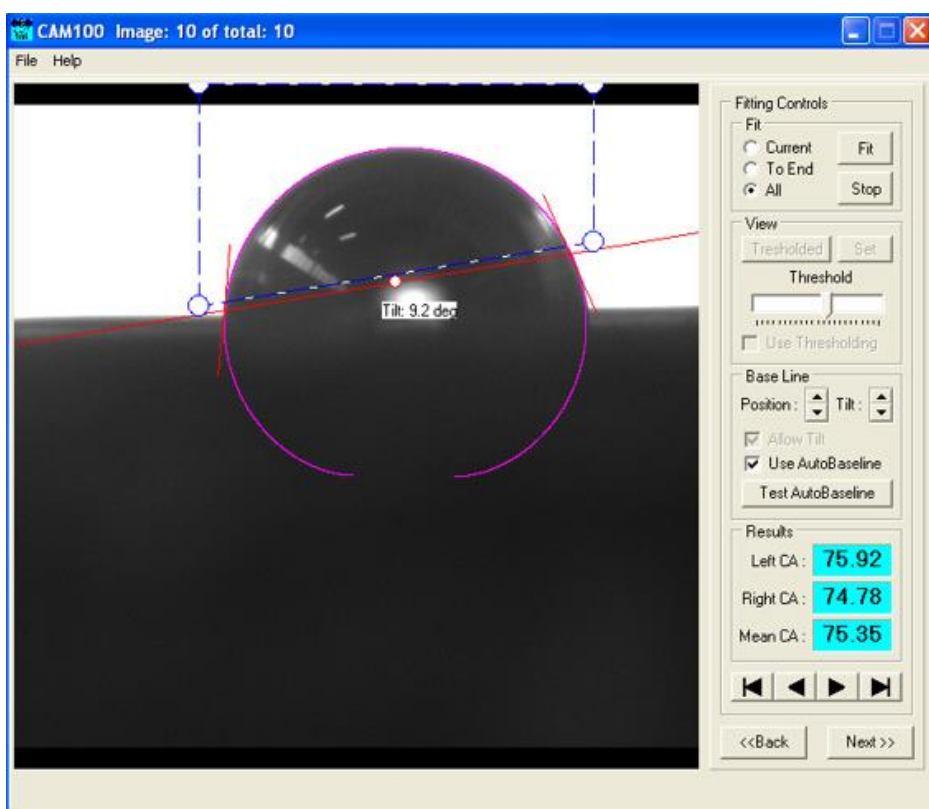


Figura 3.21: Pruebas de ángulo de contacto mediante CAM 100

El mismo procedimiento se realizó para el etilenglicol y diyodometano para todos los compuestos utilizando una jeringa para cada líquido, Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.4. Con estos valores se promedió la energía de superficie por medio del software SFE complemento del mismo goniómetro. Los resultados se obtuvieron mediante los métodos de fowkes y Wu como se muestran en la tablas 3.5 y 3.6 respectivamente

Tabla 3.4: Resultados del ángulo de contacto en los compuestos [autor]

Matriz	Refuerzo	Peso Matriz (%)	Peso Refuerzo (%)	MAPP (%)	Agua desionizada (Θ)	Etilenglicol (Θ)	Diyodometano (Θ)
PP	-----	100	--	--	54,22	59,46	45,57
PP	Eucalipto	68	68	2	71,21	42,81	53,31
PP	Eucalipto	70	70	--	81,47	58,36	25,33
PP	Pino	68	68	2	71,40	57,00	36,10
PP	Pino	70	30	--	74,94	41,09	33,75
PVC	Eucalipto	85,04	9,02	--	75,53	51,05	32,69

* Las probetas fueron limpiadas con alcohol etílico 96%

Tabla 3.5: Resultados de la energía de superficie por el método Fowkes [autor]

Matriz	Refuerzo	Peso Matriz (%)	Peso Refuerzo (%)	MAPP (%)	Metodo Fowkes (mN/m)		
					Sfe_d	Sfe_p	Sfe_tot
PP	-----	100	--	--	27,27	16,39	43,65
PP	Eucalipto	68	68	2	30,97	9,04	40,01
PP	Eucalipto	70	70	--	41,32	1,93	43,25
PP	Pino	68	68	2	35,34	6,10	41,44
PP	Pino	70	30	--	40,76	4,59	45,35
PVC	Eucalipto	85,04	9,02	--	39,10	4,22	43,32

Tabla 3.6: Resultados de la energía de superficie por el método Wu [autor].

Matriz	Refuerzo	Peso Matriz (%)	Peso Refuerzo (%)	MAPP (%)	Método Wu (mN/m)			
					Sfe_d	Sfe_p	Sfe_Tot	Sfe_err
PP	-----	100	--	--	30,96	17,65	48,61	9,47
PP	Eucalipto	68	68	2	31,93	12,47	44,40	3,08
PP	Eucalipto	70	70	--	43,60	4,58	48,18	4,83
PP	Pino	68	68	2	37,92	8,96	46,88	6,52
PP	Pino	70	30	--	40,94	8,75	49,69	3,15
PVC	Eucalipto	85,04	9,02	--	40,55	7,67	48,22	4,68

En las figura 3.22 y 3.23 se muestran las mediciones obtenidas de la energía libre superficial de todos los compuestos con fibra de madera de eucalipto y pino respectivamente por los métodos de Fowkes y Wu de mediante el software SFE.

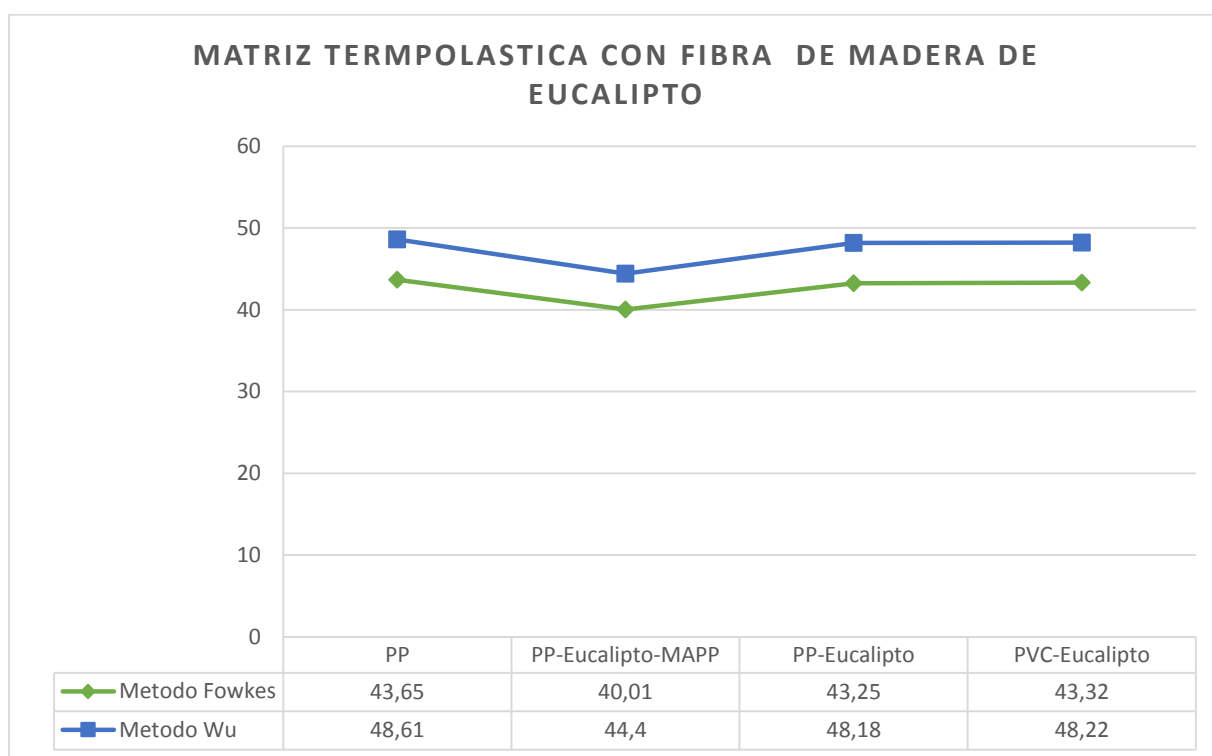


Figura 3.22: Mediciones de la energía superficial de compuestos poliméricos con eucalipto

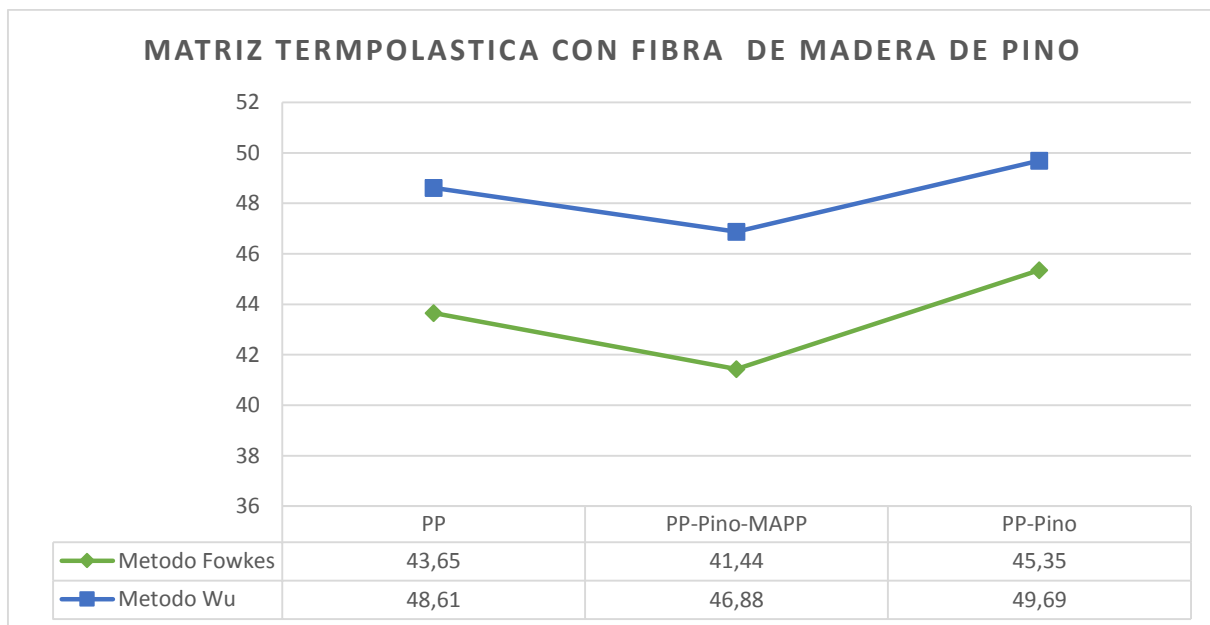


Figura 3.23: Mediciones de la energía superficial de compuestos poliméricos con Pino

En las figuras 3.24 y 3.25 se muestran se muestran las mediciones obtenidas de la componente polar de todos los compuestos con fibra de madera de eucalipto y pino respectivamente por los métodos de Fowkes y Wu de mediante el software SFE.

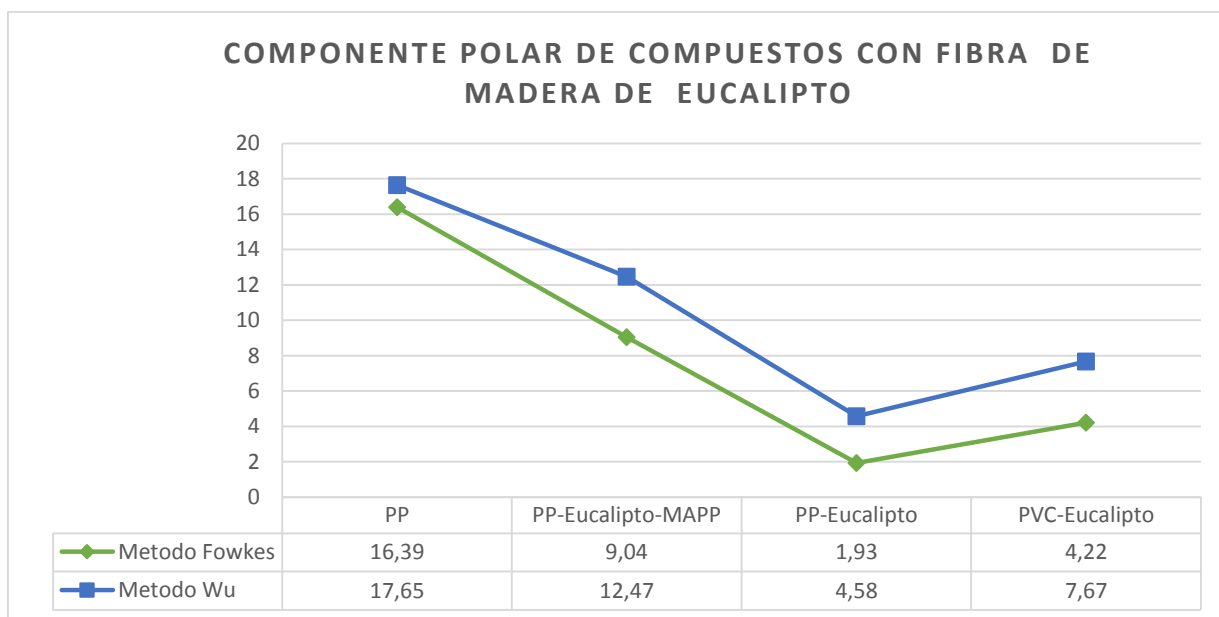


Figura 3. 24: Mediciones de la componente Polar de compuestos poliméricos con Eucalipto

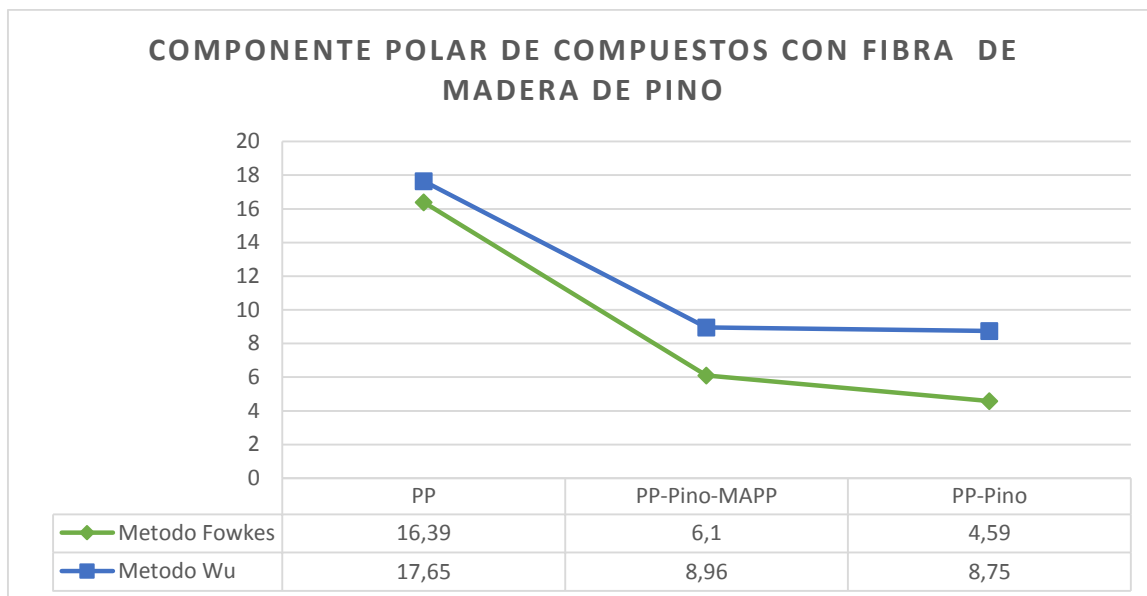


Figura 3. 25 : Mediciones de la componente Polar de compuestos poliméricos con Pino

3.3.3 Análisis de Resultados

El comportamiento en el ángulo de contacto se observa que mientras el ángulo de contacto aumenta la energía superficial baja. En el caso del polipropileno se observa una disminución en el cálculo de la energía libre superficial cuando el compuesto está presente la concentración del 2% de anhídrido maleico MAPP debido a que el componente polar aumenta y el componente disperso disminuye este efecto es más apreciable en el caso del eucalipto que en el pino. La tendencia es igual en ambos métodos de Fowkes y Wu. En el polivinilo de cloruro presenta un comportamiento similar a los compuestos de polipropileno con fibra de eucalipto como refuerzo cuando está presente el anhídrido maleico MAPP

3.4 Conclusiones

El efecto del anhídrido maleico MAPP influye en la estructura superficial del compuesto polimérico lo que provoca un crecimiento significativo en la energía superficial del material.

La presencia de MAPP, incrementa el componente polar por lo tanto mejora la adherencia de la matriz con las fibras, esto se traducirá en mejoramiento de la resistencia a la tracción y módulo elástico.

Las presiones utilizadas para la compactación de probetas encapsuladas en los compuestos poliméricos que se utilizaron son mucho menores a las usadas para las fibras naturales de 2.65 MPa y 8-12 MPa debido a la resistencia que ofrecen lo que representa una gran ventaja.

CAPITULO 4

4. ÍNDICE DE FLUIDEZ Y PRUEBAS DE INYECCIÓN EN COMPUESTOS POLIMÉRICOS DE POLIPROPILENO Y POLIVINILO DE CLORURO CON FIBRAS DE MADERA DE EUCALIPTO Y PINO

Introducción

En este capítulo se realizaron pruebas de Melt Index de los compuestos poliméricos para analizar el grado de influencia los refuerzos de eucalipto y pino sobre el índice de fluidez en los plásticos. También se realizaron pruebas de inyección de los compuestos para validar su aptitud de procesamiento. Las pruebas se realizaron en los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca y la fábrica de Consulplast S.A. ubicada en Racar de la misma ciudad.

4.1 Determinación de MFI de los compuestos WPC

Mediante análisis de Melt Index, se determina el índice de fluidez de los materiales compuestos de harina de madera de eucalipto y pino, con base en la norma ASTM D 1238, donde se realizó una comparación en los resultados de distintos compuestos con fibra y con los materiales poliméricos sin fibra. En la figura 4.1 se muestra el equipo utilizado.



Figura 4.1: Melt Index

4.2 Proceso de obtención del Índice de Fluidéz

El equipo de metl Index está formado por un cilindro con un diámetro normalizado donde se va a introducir el material compuesto polimérico por medio de un embudo metálico donde la temperatura es controlada en función de la norma. Un pistón normalizado para ensayos con un peso adicional en la parte superior es introducido en el cilindro, con un peso adicional en función del material que va a ser ensayado. El material pasa por un dado ubicado en la parte inferior con un agujero normalizado donde el material es extruido por la fuerza del peso aplicado. El perfil extruido se corta en intervalos de tiempo constantes, donde luego son pesados en una balanza con un margen de error pequeño. Los pesos de las masas son introducidas en el software del equipo y automáticamente se calcula el índice de fluidez (MFR) del compuesto. Estos resultados se pueden comprobar utilizando una fórmula en base a la norma ASTM D 1238 que se detalla a continuación.

4.2.1 Método de prueba estándar para Índice de fluidez ASTM D 1238

Este método de ensayo incluye la tasa de extrusión de resinas termoplásticas fundidas usando un plastómetro. Después de un tiempo de precalentamiento especificado, la resina es extruida a través de una boquilla con una longitud específica y diámetro del orificio en función de las condiciones recomendadas de temperatura y carga [49].

En la tabla 4.1 se muestran las condiciones de prueba para materiales de polipropileno y polivinilo de cloruro que son objeto de este estudio.

Tabla 4.1: Condiciones de Prueba ASTM D 1238 [45]

Material	Temperatura (°C)	Pesos (Kg)
Polipropileno	230	2.16
Polivinilo de Cloruro	190	21.6

Las condiciones que debe reunir para la realización del ensayo se muestran en la tabla 4.2 para la obtención del flujo de la masa y el índice de fluidez en gr/10min.

Tabla 4.2: Condiciones estándar para la masa de la muestra - ASTM D 1238 [45]

Rango de Caudal (gr/10min)	Masa sugerido de la muestra en el cilindro (gr)	Intervalo de Tiempo (min)	Factor para la obtención de caudal (gr/10min)
0.15 – 1.0	2.5 – 3.0	6.00	1.67
> 1.0 – 3.5	3.0 – 5.0	3.00	3.33
> 3.5 – 10	4.0 – 8.0	1.00	10.00
> 10 – 25	4.0 – 8.0	0.50	20.00
> 25	4.0 – 8.0	0.25	40.00

Las resinas utilizadas para el proceso de moldeo por inyección del polipropileno y el polivinilo de cloruro tienen valores mayores a 10 gr/10min de acuerdo con las fichas técnicas. De acuerdo con la norma, la masa es de 6 gramos en intervalos de 50 segundos.

Para hacerlo de forma manual para el cálculo de flujo del índice de fluidez (MFR) se utiliza la siguiente formula: [45]

$$\text{Índice de Fluidez (MFR)} = \frac{426 \times L \times d}{t}$$

Donde:

L: Longitud en (cm) del recorrido del pistón calibrado

d: Densidad de la resina fundida (gr/cm³)

t: Tiempo (seg) de recorrido del pistón de longitud L

426: es un valor medio en las zonas (cm²) del pistón y el cilindro por 600

4.2.2 Resultados del Melt Index

En las pruebas realizadas en el Melt Index en la resina de 100% de polipropileno a una temperatura de 230 °C y un peso de 2.16 Kg como recomienda la norma en la tabla 4.1 el resultado fue de 12.60 gr/10min que coincide con el valor dado por el proveedor.

La influencia del refuerzo de harina de madera de eucalipto y pino en concentraciones entre 28 y 30% en el material compuesto no permitía el paso continuo del material fundido por el dado; por tanto se modificó la temperatura a 260 °C. En la tabla 4.3 se muestran los resultados obtenidos de las pruebas en el Melt Index.

Tabla 4.3: Resultados del Melt Index para el Polipropileno [autor]

Matriz	Refuerzo	Peso Matriz (%)	Peso Refuerzo (%)	MAPP (%)	Temperatura (°C)	Índice de Fluidez (gr/10min)
PP	-----	100	--	--	230	12.60
PP	-----	100	--	--	260	19.92
PP	Eucalipto	68	30	2	260	15.24
PP	Eucalipto	70	30	--	260	12.84
PP	Pino	68	30	2	260	13.5
PP	Pino	70	30	--	260	11.82

En la tabla 4.4 se muestran las pruebas de Melt Index realizadas a las formulaciones de resinas de polivinilo de cloruro realizadas en la fábrica de Consulplast S.A. los parámetros utilizados se muestran en la tabla 4.1

Tabla 4.4: Resultados del Melt Index para el Polivinilo de Cloruro [autor]

PVC-500 (%)	Refuerzo (%)	BC-40 (%)	Acido Esteárico (%)	Dióxido de Titanio (%)	Carbonato de Calcio (%)	Índice de Fluidez (gr/10 min)
94.79	----	3.79	0.47	0.95	---	10.649
85,04	9,02	0,43	0,07	3,74	1,7	0.1295

4.2.3 Análisis de resultados

Con las pruebas realizadas en el Melt Index se demuestra que la presencia de la fibra de madera en los compuestos poliméricos influye en el índice de fluidez reduciéndolos considerablemente. En el caso del polivinilo de cloruro el índice de fluidez está muy lejos de ser la adecuada esto se debe en gran medida a la resina y aditivos empleados.

Se aconseja elevar la temperatura en el polipropileno hasta 260 °C se consiguen índices de fluidez de 19.92 gr/10min aproximadamente, sin perjuicio de las propiedades de las fibras.

4.3 Experimentación realizada para la obtención de probetas inyectadas

En esta fase experimental se empleó una maquina inyectora de marca DR. BOY 35E, que se muestra en la figura 4.2 que cuenta los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana, en la que se inyectaron los pellets previamente extruidos y pelletizados de compuestos poliméricos de polipropileno con harina de madera de eucalipto y pino como material de refuerzo a partir del residuos de madera sawdust.



Figura 4.2: Inyectora automática DR. BOY 35E

Previamente a la inyección los pellets de los compuestos poliméricos fueron secados en el horno Memmert UN 110 por un intervalo de 6 horas a 105 °C para garantizar que humedad sea menor al 1 %. En la tabla 4.5 se muestran los parámetros de la inyectora DR. BOY 35E con polipropileno.

Tabla 4.5: Parámetros de la inyectora DR. BOY 35E con polipropileno [38]

Propiedades	Unidades	Valor
Fuerza de cierre	KN	350
Fuerza para abrir el molde	KN	18.42857
Tiempo de aseguramiento de molde	s	90
Velocidad de cierre de molde	mm/s	450 – 60
Velocidad de apertura de molde	mm/s	281.1 – 43.4
Velocidad de desplazamiento boquilla Hacia delante/atrás	mm/s	19
Fuerza de apoyo de boquilla	KN	36
Valor nominal de tiempo de plastificación	s	45
Tiempo de plastificación	s	12
Velocidad promedio de plastificación	mm/s	200
Perfil de temperaturas	°C	185, 185, 185, 190, 195
Presión de inyección	bar	510.95
Presión del molde	bar	600
Contrapresión	bar	50

4.4 Obtención de probetas normalizadas

Las probetas normalizadas fueron obtenidas mediante la norma ISO tipo B 527 en un molde normalizado utilizado para ensayos generales y equivalente a la norma ASTM D 628. Las pruebas se realizaron en dos fases.

Las probetas obtenidas en la primera fase se realizaron siguiendo los parámetros planteados en la tabla 4.5 los resultados se muestran en la figura 4.3 y la geometría de la probeta se muestra se puede ver en la figura 4.4.



Figura 4.3: Geometría obtenida según la norma ISO tipo B 527

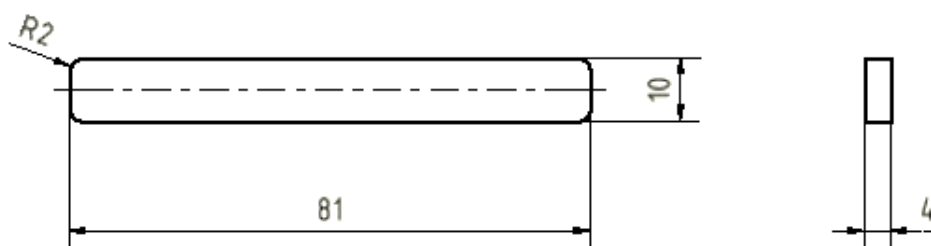


Figura 4.4: Dimensiones de la probeta según la norma ISO tipo B 527

Las probetas obtenidas en la segunda fase se realizaron unas modificaciones en algunos parámetros y se adiciono un 5 % de lubricante (ácido esteárico). Las modificaciones que se realizaron para buscar los parámetros correctos de operación se cambiaron principalmente en las temperaturas y presiones.

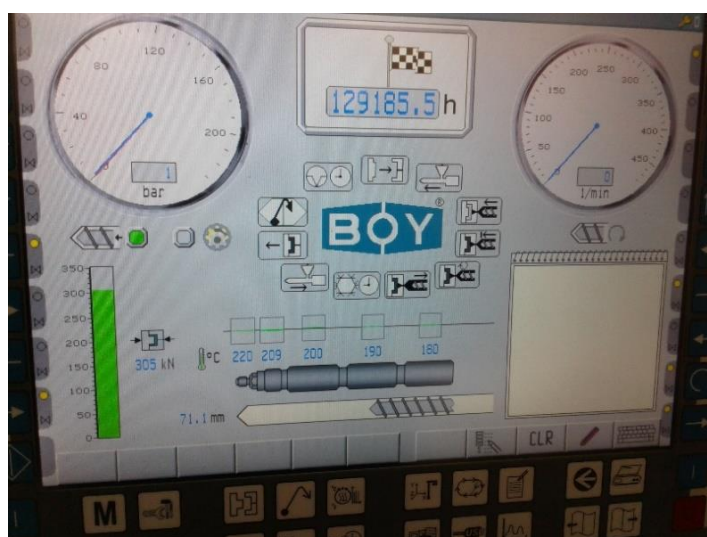


Figura 4.5: Control de mando de la Inyectora DR. BOY 35E

En la tabla 4.6 se muestra un resumen con los nuevos parámetros optimizados para inyectar los materiales compuestos.

Tabla 4. 6: Parámetros optimizados en la Inyectora DR. BOY 35E

Propiedades	Unidades	Valor
Fuerza de cierre	KN	350
Tiempo de ciclo	Seg	50
Perfil de temperaturas	°C	180, 190, 200, 210, 220
Presión de inyección	Bar	1050
Presión de llenado	Bar	60, 100
Diámetro de husillo	mm	24

En la figura 4.6 se muestran las probetas obtenidas en la segunda fase cambiado los parámetros y adicionado un 5% de lubricante (ácido esteárico).



Figura 4.6 a: Probeta de PP-Eucalipto- 5% lubricante



Figura 4.6 b: Probeta de PP-Pino- 5% lubricante



Figura 4.6 c: Probeta de PP-Eucalipto-MAPP-5% lub.



Figura 4. 6 d: Probeta de PP-Pino-MAPP-5% lub.

4.4.1 Análisis de resultados

Los parámetros utilizados en la segunda fase adicionando un 5 % de plastificante de ácido esteárico se obtuvieron mejores resultados, mejoró mucho el acabado superficial con un buen tono de color, mejoró notablemente el grado de homogenización en la estructura de las probetas. Una desventaja de trabajar con el ácido esteárico es la reacción química que se produce en la mezcla plastificada se expande el material al salir de la boquilla, esto obligó a bajar las presiones con las que se empleó en la primera fase en margen de 10 bares.

4.5 Inyección del PVC – Harina de Madera de Eucalipto a partir de Sawdust

Las pruebas se realizaron en la fábrica de Consulplast S.A. una vez que se obtuvieron los pellets se procedió a procesar el material compuesto por medio de la inyección por moldeo, para ello la empresa cuenta con una inyectora Dakumar DKM – SV330 como se muestra en la figura 4.7.



Figura 4.7: Inyectora Dakumar DKM – SV330 (Consulplast)

En la tabla 4.7 se muestran las propiedades más importantes de la maquina inyectora Dakumar DKM – SV330. La máquina inyectora cuenta con 2 años de uso aproximadamente el uso es continuo 24 horas diarias todos los días. El estado actual de la maquina inyectora se encuentra en óptimas condiciones.

Tabla 4.7: Propiedades de la Inyectora Dakumar DKM – SV330 (Consulplast) [46]

Propiedades	Unidades	Valor
Velocidad de tornillo	rpm	225
Presión de inyección	MPa	156
Potencia del motor	Kw	15 + 15
Carrera de apertura	mm	630
Dimensiones	mm	7000 x 1700 x 2300
Diámetro de husillo	mm	70
Volumen de materia inyectable	gr	1159
Fuerza de cierre	KN	3300
Peso	Kg	13500

Los parámetros utilizados en el proceso de inyección por moldeo del material compuesto de PVC con harina de madera de eucalipto como refuerzo se muestran en la tabla 4.8

Tabla 4.8: Parámetros empleados para inyección (Consulplast)

Matriz	Refuerzo	Velocidad del tornillo (rpm)	Temperaturas de las Zonas			
			Zona 1 (°C)	Zona 2 (°C)	Zona 3 (°C)	Zona 4 (°C)
PVC	Eucalipto	160	150	170	180	190

La geometría del molde se la puede ver mediante el producto que se esperó inyectar se muestra en la figura 4.8. Los resultados de las pruebas se muestran en la figura 4.9



Figura 4.8: Producto inyectado con PP



Figura 4.9: Producto inyectado con PVC-Eucalipto

Con estos resultados se llega a la conclusión que la formulación planteada con la resina e insumos proveídos por la empresa no son idóneos para el proceso de inyección, esto se pudo verificar calculando el índice de fluidez en el Melt Index de la tabla 4.4 basándose en la norma ASTM D 1238 que dió como resultado 0,1295 gr/105min muy por debajo de los 10 gr/10min esperados como consecuencia la cavidad del molde no se llena por completo.

4.6 Conclusiones

Las pruebas del Melt Index en los materiales compuestos poliméricos se observa una caída del índice de fluidez del 23.5% y 35.5% de la fibra de eucalipto con MAPP y sin MAPP respectivamente. El comportamiento de la fibra de pino mantiene la tendencia la caída del índice de fluidez es 32.2% y 40.7% con MAPP y sin MAPP respectivamente.

El anhídrido maleico MAPP representa un buen aditivo para mejorar notablemente el índice de fluidez del compuesto polimérico. Por lo tanto además de actuar como agente de acople entre la matriz y la fibra tiene un efecto lubricante que facilita su procesamiento.

En las pruebas por moldeo de inyección adicionándole un 5% de ácido esteárico mejora considerablemente las propiedades del producto de la inyección.

La formulación planteada para la inyección el compuesto del polivinilo de cloruro con fibra de madera de eucalipto no es la adecuada ya que el índice de fluidez está un 98.7 % debajo del valor para inyectar materiales poliméricos compuestos de pvc.

Conclusiones Generales

En la investigación se demuestra que las fibras naturales y residuos de madera como la harina de madera poseen un gran potencial y una gran demanda para formular materiales compuestos.

Los materiales compuestos con matrices termoplásticas refuerzos con fibras naturales de madera son muy amigables con el medio ambiente y mejoran algunas propiedades como la flexión, módulo de Elasticidad de la madera lo que genera que cada vez más se sustituya a fibras no naturales o la misma madera.

El procesamiento por extrusión tiene un mejor comportamiento en el polipropileno con harina de madera de eucalipto como refuerzo comparando con el pino, debido a la diferencia de densidades ya que la fibra de pino ocupa más volumen que la fibra del eucalipto.

Con la presencia del aditivo anhídrido maleico MAPP en una concentración del 2 % mejora la fluidez del compuesto.

Para la obtención de pellets de polivinilo de cloruro con fibra de eucalipto es indispensable la granulometría del tamizado sea muy fina para que exista una buena adhesión entre la resina aditivos y fibra.

El efecto del anhídrido maleico MAPP influye en la estructura superficial del compuesto polimérico lo que provoca un crecimiento significativo en la energía superficial del material.

La presencia de MAPP, incrementa el componente polar por lo tanto mejora la adherencia de la matriz con las fibras, esto se traducirá en mejoramiento de la resistencia a la tracción y módulo elástico.

Las pruebas del Melt Index en los materiales compuestos poliméricos se observa una caída del índice de fluidez del 23.5% y 35.5% de la fibra de eucalipto con MAPP y sin MAPP respectivamente. El comportamiento de la fibra de pino mantiene la tendencia la caída del índice de fluidez es 32.2% y 40.7% con MAPP y sin MAPP respectivamente.

El anhídrido maleico MAPP representa un buen aditivo para mejorar notablemente el índice de fluidez del compuesto polimérico. Por lo tanto además de actuar como agente de acople entre la matriz y la fibra tiene un efecto lubricante que facilita su procesamiento.

Recomendaciones

Se recomienda realizar técnicas de blanqueamiento de la harina de madera para diversificar sus aplicaciones.

Se recomienda evaluar las propiedades mecánicas de los materiales compuestos obtenidos para validar su efectividad en cuanto a propiedades mecánicas

Se recomienda realizar procesos de simulación de las propiedades mecánicas para garantizar su resistencia en futuras aplicaciones estructurales.

Recomendaciones y trabajo futuro

El desarrollo de compuestos poliméricos con fibras naturales augura un crecimiento alto por las grandes ventajas en aplicaciones en áreas como la construcción y autopartes automotrices. Razón por la cual se recomienda seguir incursionando en el desarrollo resinas termoplásticas con refuerzos de fibras de madera.

Se recomienda realizar técnicas de blanqueamiento de la harina de madera para diversificar sus aplicaciones.

Se recomienda evaluar las propiedades mecánicas de los materiales compuestos obtenidos para validar su efectividad en cuanto a propiedades mecánicas

Se recomienda realizar procesos de simulación de las propiedades mecánicas para garantizar su resistencia en futuras aplicaciones estructurales.

Referencias

- [1] «Biodegradable Waste - Environment - European Commission». .
- [2] «Vehicle Technologies Office: Moving America Forward with Clean Vehicles | Department of Energy». .
- [3] A. K. Bledzki y V. E. Sperber, *Comportamientos Recientes y Aplicaciones de Polímeros Rellenos de Fibra Natural*. Universität Kassel, Alemania, 2003.
- [4] R. Bouza Padín, «Diseño y caracterización de nuevos materiales compuestos polipropileno y madera: estudio del viniltrimetoxisilano como agente de acoplamiento», 2008.
- [5] «ELISAVA TdD | 20 | Materiales Compuestos». .
- [6] Á. G. Velázquez, M. G. A. Moreno, H. E. C. Ramírez, R. A. B. Páez, y L. T. Palomar, «Madera plástica con paja de trigo y matriz polimérica», *Tecnol. En Marcha*, vol. 26, n.º 3, pp. 26–37, 2013.
- [7] F. Del Río Basora, S. Hernández Sotelo, y D. Sosa González, «Estudio técnico para la aplicación de polímeros termoplásticos, termoestables y elastoméricos comerciales.», abr. 2016.
- [8] E. A. Gómez, L. A. Ríos, y J. D. Peña, «Madera, un Potencial Material Lignocelulósico para la Producción de Biocombustibles en Colombia», *Inf. Tecnológica*, vol. 23, n.º 6, pp. 73-86, 2012.
- [9] G. Koronis, A. Silva, y M. Fontul, «Green composites: A review of adequate materials for automotive applications», *Compos. Part B Eng.*, vol. 44, n.º 1, pp. 120-127, ene. 2013.
- [10] V. H. Guerrero, D. Villamar, y S. Galeas, «Materiales compuestos lignocelulósicos obtenidos mediante extrusión».
- [11] A. Ashori, «Wood–plastic composites as promising green-composites for automotive industries!», *Bioresour. Technol.*, vol. 99, n.º 11, pp. 4661-4667, jul. 2008.
- [12] C. C. Barahona, J. Mera, D. Martínez, y J. Rodríguez, «Aprovechamiento de polipropileno y polietileno de alta densidad reciclados, reforzados con fibra vegetal, Tetra (Stromanthe Stromathoides)», *Rev. Iberoam. Polímeros*, vol. 11, n.º 7, pp. 417–427, 2010.
- [13] A. E. D. Tobón, W. A. A. Chaparro, y W. G. Rivera, «Mejoramiento de las Propiedades de Tensión en WPC de LDPE: HIPS/Fibra Natural Mediante Entrecruzamiento con DCP», *Polímeros Ciênc. E Tecnol.*, vol. 24, n.º 3, pp. 291-299, 2014.

- [14] S. Balseca y A. Pablo, «Obtención de compuestos de polietileno reforzado con fibras de abacá mediante moldeo por compresión», feb. 2009.
- [15] G. S. de Hoog y J. Guarro, Eds., *Atlas of clinical fungi*, 2. print. Delft: Centraalbureau voor Schimmelcultures [u.a.], 1996.
- [16] M. G. Salemane y A. S. Luyt, «Thermal and mechanical properties of polypropylene–wood powder composites», *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 100, n.º 5, pp. 4173-4180, jun. 2006.
- [17] C. Rodríguez Martínez y O. A. Gamba Álvarez, «Plan de negocios para el diseño de artículos fabricados en madera plástica para la industria de la construcción», 2009.
- [18] D. Sandberg y P. Navi, *Introduction to thermo-hydro-mechanical (THM) wood processing*. Växjö: School of Technology and Design, Växjö University, 2007.
- [19] C. Paredes, C. Correa, y C. Tapia, «Comparación de las propiedades de compuestos en base de polipropileno en mezcla con diversos residuos agroindustriales del Ecuador», mar. 2009.
- [20] S. Kim, «A column generation heuristic for congested facility location problem with clearing functions», *J. Oper. Res. Soc.*, vol. 64, n.º 12, pp. 1780-1789, dic. 2013.
- [21] T. Sánchez-Córdova, A. Aldrete, V. M. Cetina-Alcalá, y J. López-Upton, «Caracterización de medios de crecimiento compuestos por corteza de pino y aserrín», *Madera Bosques*, vol. 14, n.º 2, pp. 41–49, 2008.
- [22] O. F. Delgado y J. A. Medina, «Extrusión de perfiles espumados de madera plástica», *Rev. Ing.*, vol. 0, n.º 18, pp. 56-63, 2003.
- [23] M. Kociszewski, C. Gozdecki, A. Wilczyński, S. Zajchowski, y J. Mirowski, «Effect of industrial wood particle size on mechanical properties of wood-polyvinyl chloride composites», *Eur. J. Wood Wood Prod.*, vol. 70, n.º 1-3, pp. 113-118, feb. 2011.
- [24] X. Bai, Q. Wang, S. Sui, y C. Zhang, «The effects of wood-flour on combustion and thermal degradation behaviors of PVC in wood-flour/poly(vinyl chloride) composites», *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 91, n.º 1, pp. 34-39, may 2011.
- [25] F. Wang, Z. Zhang, Q. Wang, y J. Tang, «Fire-retardant and smoke-suppressant performance of an intumescent waterborne amino-resin fire-retardant coating for wood», *Front. For. China*, vol. 3, n.º 4, pp. 487-492, oct. 2008.
- [26] A. A. Klyosov, *Wood-Plastic Composites*. John Wiley & Sons, 2007.
- [27] P. Brøndsted y R. P. L. Nijssen, *Advances in Wind Turbine Blade Design and Materials*. Elsevier, 2013.

- [28] V. Ulloa y M. José, «Desarrollo de biopolímeros a partir de almidón de corteza de yuca (*Manihot esculenta*).», 2012.
- [29] J. Salme y M. Verónica, «Diseño de una Planta Piloto para la Obtención de Granza de Madera Plástica a Partir de Polietileno Reciclado con Partículas Lignocelulósicas (Aserrín)», Thesis, Quito, 2015., 2015.
- [30] «Componentes de los residuos madereros». .
- [31] «Nuevo proyecto para utilizar el aserrín de forma ecológica - Cuba - Juventud Rebelde - Diario de la juventud cubana». .
- [32] R. J. Sanjuan-Raygoza y C. F. Jasso-Gastinel, «Efecto de la fibra de agave de desecho en el reforzamiento de polipropileno virgen o reciclado», *Rev. Mex. Ing. Quím.*, vol. 8, n.º 3, pp. 319–327, 2009.
- [33] M. A. Hidalgo y J. H. Mina, «DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA Y MECÁNICA DE UN MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ LDPE/PP REFORZADA CON POLVO DE MADERA», *Rev. Colomb. Mater.*, vol. 0, n.º 5, pp. 193-200, may 2014.
- [34] «Materiales Compuestos de Matriz Termoplástica: Estructura Química y Propiedades | Ingeniería de Materiales.» .
- [35] «Microsoft Word - Tema 2. Tipos de plasticos, aditivación y mezclado UA.doc - Tema2.pdf». .
- [36] N. Petchwattana y S. Covavisaruch, «Effects of Rice Hull Particle Size and Content on the Mechanical Properties and Visual Appearance of Wood Plastic Composites Prepared from Poly(vinyl chloride)», *J. Bionic Eng.*, vol. 10, n.º 1, pp. 110-117, ene. 2013.
- [37] C. E. Wilkes, J. W. Summers, y C. A. Daniels, *PVC Handbook*. Munich ; Cincinnati: Hanser Publications, 2005.
- [38] C. Zambrano, J. Alberto, G. Jaramillo, y A. Xavier, «Caracterización de nanocompuestos de polietileno de baja densidad usando organoarcilla e inhibidores de corrosión en fase de vapor», 2013.
- [39] C. V. Cupul, R. H. Cruz, A. Caballero, y L. M. Rangel, «Propiedades de Mezclas Extrudidas a Base de Polietileno de Baja Densidad y Polianilina», *Inf. Tecnológica*, vol. 19, n.º 2, pp. 69–79, 2008.
- [40] V. Jaramillo y L. Eduardo, «Obtención experimental de un material biocompuesto a base de una matriz polimérica y reforzada con fibras naturales de guadúa angustifolia proveniente del Ecuador», jun. 2013.
- [41] «Polipropileno | Textos Científicos». [En línea]. Disponible en: <http://www.textoscientificos.com/polimeros/polipropileno>.

- [42] K. V. Ordoñez Parapi y F. O. Zhagüi Barbecho, «Diseño y construcción de equipo para obtener probetas encapsuladas de fibra natural para medición de energía libre superficial», mar. 2015.
- [43] «10.pdf». [En línea]. Disponible en:
<http://www3.fi.mdp.edu.ar/tecnologia/archivos/TecFab/10.pdf>.
- [44] M. Hinojosa, «Autoafinidad de superficies de fractura del vidrio», *ResearchGate*, vol. IV, n.º 13, p. 27, ene. 2001.
- [45] I. Urgilés y D. Fabián, «Activación superficial de polietileno, mediante plasma frío de baja presión como pre-tratamiento para mejorar adhesión de tintes en impresiones», ago. 2014.
- [46] S. Pesántez y P. Marielisa, «Limpieza superficial de chapa de acero impregnada con aceite mediante la utilización de plasma frío a baja presión», jul. 2011.
- [47] D. Y. Kwok y A. W. Neumann, «Contact angle measurement and contact angle interpretation», *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 81, n.º 3, pp. 167-249, sep. 1999.
- [48] D. Santos, S. N.c, y D. Goncalves, «Cambios en la mojabilidad en superficies de maderas tratadas térmicamente: Angulo de contacto y energía libre superficial», *Maderas Cienc. Tecnol.*, vol. 18, n.º 2, pp. 383-394, abr. 2016.
- [49] «D1238_Melt_Flow_rate.pdf». [En línea]. Disponible en: http://www.asi-team.com/asi%20team/gottfert/Gottfert%20data/D1238_Melt_Flow_rate.pdf.

ANEXOS

ANEXO 1

Pruebas para la obtención de la Energía superficial libre en el Polipropileno

Surface free energy measurement report

KSV Instruments Ltd

Experimental Setup

Name : DARWIN

User : DARWIN

Date : 16/07/2016 13:02:27

Solid

Name : POLIPROPILENO

Density [g/cm3] :

MW :

Sfe [mN/m] :

Original Measurements

Liquid	Cos ()	θ	γ	γ_d	γ^+	γ^-
Water	0,585	54,22	72,80	21,80	25,50	25,50
Ethylene Glycol	0,508	59,46	48,00	29,00	1,92	47,00
Diiodomethane	0,700	45,57	50,80	50,80	0,00	0,00

Calculated values

Method	Item	Value	Unit
Fowkes	Sfe_d	27,27	mN/m
Fowkes	Sfe_p	16,39	mN/m
Fowkes	Sfe_tot	43,65	mN/m
Wu	Sfe_d	30,96	mN/m
Wu	Sfe_p	17,65	mN/m
Wu	Sfe_tot	48,61	mN/m
Wu	Sfe_err	9,47	mN/m
AcidBase	Sfe_LW	36,70	mN/m
AcidBase	V ⁺ Sfe_A	-0,82	V ⁺ mN/m
AcidBase	V ⁺ Sfe_B	6,64	V ⁺ mN/m
AcidBase	Sfe_AB	-10,92	mN/m
AcidBase	Sfe_tot	47,63	mN/m
AcidBase	Sfe_err	0,00	mN/m

ANEXO 2

Pruebas para la obtención de la Energía superficial libre en materiales compuestos Poliméricos de Polipropileno-Eucalipto-MAPP

Surface free energy measurement report	KSV Instruments Ltd
--	---------------------

Experimental Setup

Name : DARWIN	User : DARWIN	Date : 09/07/2016 14:38:32
---------------	---------------	----------------------------

Solid

Name : PP+EUCALIPTO+MAPP	Density [g/cm3] :	MW :	Sfe [mN/m] :
--------------------------	-------------------	------	--------------

Original Measurements

Liquid	Cos ()	θ	γ	γ_d	γ^+	γ^-
Water	0,322	71,21	72,80	21,80	25,50	25,50
Ethylene Glycol	0,734	42,81	48,00	29,00	1,92	47,00
Diiodomethane	0,597	53,31	50,80	50,80	0,00	0,00

Calculated values

Method	Item	Value	Unit
Fowkes	Sfe_d	30,97	mN/m
Fowkes	Sfe_p	9,04	mN/m
Fowkes	Sfe_tot	40,01	mN/m
Wu	Sfe_d	31,93	mN/m
Wu	Sfe_p	12,47	mN/m
Wu	Sfe_tot	44,40	mN/m
Wu	Sfe_err	3,08	mN/m
AcidBase	Sfe_LW	32,41	mN/m
AcidBase	V ^{'''} Sfe_A	0,92	V ^{'''} mN/m
AcidBase	V ^{'''} Sfe_B	3,35	V ^{'''} mN/m
AcidBase	Sfe_AB	6,16	mN/m
AcidBase	Sfe_tot	38,57	mN/m
AcidBase	Sfe_err	0,00	mN/m

ANEXO 3

Pruebas para la obtención de la Energía superficial libre en materiales compuestos Poliméricos de Polipropileno-Eucalipto

Surface free energy measurement report	KSV Instruments Ltd
--	---------------------

Experimental Setup

Name : DARWIN	User : DARWIN	Date : 09/07/2016
---------------	---------------	-------------------

Solid

Name : PP+EUCALIPTO	Density [g/cm3] :	MW :	Sfe [mN/m] :
---------------------	-------------------	------	--------------

Original Measurements

Liquid	Cos ()	θ	γ	γ_d	γ^+	γ^-
Water	0,148	81,47	72,80	21,80	25,50	25,50
Ethylene Glycol	0,525	58,36	48,00	29,00	1,92	47,00
Diiodomethane	0,904	25,33	50,80	50,80	0,00	0,00

Calculated values

Method	Item	Value	Unit
Fowkes	Sfe_d	41,32	mN/m
Fowkes	Sfe_p	1,93	mN/m
Fowkes	Sfe_tot	43,25	mN/m
Wu	Sfe_d	43,60	mN/m
Wu	Sfe_p	4,58	mN/m
Wu	Sfe_tot	48,18	mN/m
Wu	Sfe_err	4,83	mN/m
AcidBase	Sfe_LW	46,03	mN/m
AcidBase	V ^{'''} Sfe_A	-0,50	V ^{'''} mN/m
AcidBase	V ^{'''} Sfe_B	2,50	V ^{'''} mN/m
AcidBase	Sfe_AB	-2,49	mN/m
AcidBase	Sfe_tot	48,53	mN/m
AcidBase	Sfe_err	0,00	mN/m

ANEXO 4

Pruebas para la obtención de la Energía superficial libre en materiales compuestos Poliméricos de Polipropileno-Pino-MAPP

Poliméricos

Surface free energy measurement report	KSV Instruments Ltd
--	---------------------

Experimental Setup

Name : DARWIN	User : DARWIN	Date : 09/07/2016 14:35:46
---------------	---------------	----------------------------

Solid

Name : PP+PINO+MAPP	Density [g/cm3] :	MW :	Sfe [mN/m] :
---------------------	-------------------	------	--------------

Original Measurements

Liquid	Cos ()	θ	γ	γ_d	γ^+	γ^-
Water	0,319	71,40	72,80	21,80	25,50	25,50
Ethylene Glycol	0,545	57,00	48,00	29,00	1,92	47,00
Diiodomethane	0,808	36,10	50,80	50,80	0,00	0,00

Calculated values

Method	Item	Value	Unit
Fowkes	Sfe_d	35,34	mN/m
Fowkes	Sfe_p	6,10	mN/m
Fowkes	Sfe_tot	41,44	mN/m
Wu	Sfe_d	37,92	mN/m
Wu	Sfe_p	8,96	mN/m
Wu	Sfe_tot	46,88	mN/m
Wu	Sfe_err	6,52	mN/m
AcidBase	Sfe_LW	41,51	mN/m
AcidBase	V ^{'''} Sfe_A	-0,47	V ^{'''} mN/m
AcidBase	V ^{'''} Sfe_B	4,02	V ^{'''} mN/m
AcidBase	Sfe_AB	-3,74	mN/m
AcidBase	Sfe_tot	45,25	mN/m
AcidBase	Sfe_err	0,00	mN/m

ANEXO 5

Pruebas para la obtención de la Energía superficial libre en materiales compuestos Poliméricos de Polipropileno-Pino

Surface free energy measurement report	KSV Instruments Ltd
--	---------------------

Experimental Setup

Name : DARWIN	User : DARWIN	Date : 09/07/2016 14:18:05
---------------	---------------	----------------------------

Solid

Name : PP+PINO	Density [g/cm3] :	MW :	Sfe [mN/m] :
----------------	-------------------	------	--------------

Original Measurements

Liquid	Cos ()	θ	γ	γ_d	γ^+	γ^-
Water	0,260	74,94	72,80	21,80	25,50	25,50
Ethylene Glycol	0,754	41,09	48,00	29,00	1,92	47,00
Diiodomethane	0,831	33,75	50,80	50,80	0,00	0,00

Calculated values

Method	Item	Value	Unit
Fowkes	Sfe_d	40,76	mN/m
Fowkes	Sfe_p	4,59	mN/m
Fowkes	Sfe_tot	45,35	mN/m
Wu	Sfe_d	40,94	mN/m
Wu	Sfe_p	8,75	mN/m
Wu	Sfe_tot	49,69	mN/m
Wu	Sfe_err	3,15	mN/m
AcidBase	Sfe_LW	42,60	mN/m
AcidBase	V ⁺ Sfe_A	0,50	V ⁺ mN/m
AcidBase	V ⁺ Sfe_B	2,55	V ⁺ mN/m
AcidBase	Sfe_AB	2,53	mN/m
AcidBase	Sfe_tot	45,13	mN/m
AcidBase	Sfe_err	0,00	mN/m

ANEXO 6

Pruebas para la obtención de la Energía superficial libre en materiales compuestos Poliméricos de Polivinilo de Cloruro-Eucalipto

Surface free energy measurement report

KSV Instruments Ltd

Experimental Setup

Name : DARWIN

User : DARWIN

Date : 09/07/2016 14:41:12

Solid

Name : PVC+EUCALIPTO

Density [g/cm3] :

MW :

Sfe [mN/m] :

Original Measurements

Liquid	Cos ()	θ	γ	γ_d	γ^+	γ^-
Water	0,250	75,53	72,80	21,80	25,50	25,50
Ethylene Glycol	0,629	51,05	48,00	29,00	1,92	47,00
Diiodomethane	0,842	32,69	50,80	50,80	0,00	0,00

Calculated values

Method	Item	Value	Unit
Fowkes	Sfe_d	39,10	mN/m
Fowkes	Sfe_p	4,22	mN/m
Fowkes	Sfe_tot	43,32	mN/m
Wu	Sfe_d	40,55	mN/m
Wu	Sfe_p	7,67	mN/m
Wu	Sfe_tot	48,22	mN/m
Wu	Sfe_err	4,68	mN/m
AcidBase	Sfe_LW	43,07	mN/m
AcidBase	V ^{'''} Sfe_A	-0,06	V ^{'''} mN/m
AcidBase	V ^{'''} Sfe_B	3,00	V ^{'''} mN/m
AcidBase	Sfe_AB	-0,36	mN/m
AcidBase	Sfe_tot	43,44	mN/m
AcidBase	Sfe_err	0,00	mN/m