



Centro de Investigación Científica de
Yucatán, A.C.



Posgrado en Materiales Poliméricos

PREPARACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO
CON FIBRAS DE BONOTE DE COCO Y POLIETILENO
DE ALTA DENSIDAD RECICLADO Y EVALUACIÓN
DE SUS PROPIEDADES MECÁNICAS Y
RESISTENCIA AL ATAQUE DE *PHANEROCHAETE*
CHRYSOSPORIUM

Tesis de maestría

I.Q.I. Daniel Enrique Ramírez Chan

En opción al título de

MAESTRO EN CIENCIAS

MATERIALES POLIMÉRICOS

Mérida, Yucatán



Mérida, Yucatán, México; a 15 de febrero de 2012

DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en la sección de Materiales y Métodos Experimentales, los Resultados y Discusión de este documento proviene de las actividades de experimentación realizadas durante el período que se me asignó para desarrollar mi trabajo de tesis, en las Unidades y Laboratorios del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y que a razón de lo anterior y en contraprestación de los servicios educativos o de apoyo que me fueron brindados, dicha información, en términos de la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, le pertenece patrimonialmente a dicho Centro de Investigación. Por otra parte, en virtud de lo ya manifestado, reconozco que de igual manera los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que deriven o pudieran derivar de lo correspondiente a dicha información, le pertenecen patrimonialmente al Centro de Investigación Científica, A.C., y en el mismo tenor, reconozco que si derivaren de este trabajo productos intelectuales o desarrollos tecnológicos, en lo especial, estos se registrarán en todo caso por lo dispuesto por la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, en el tenor de lo expuesto en la presente Declaración.



I.Q.I Daniel Enrique Ramírez Chan



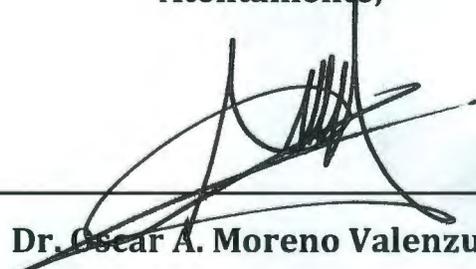
RECONOCIMIENTO

Por medio de la presente, hago constar que el trabajo de tesis titulado

Preparación de un material compuesto con fibras de bonote de coco y polietileno de alta densidad reciclado y evaluación de sus propiedades mecánicas y resistencia al ataque de *phanerochaete chrysosporium*

perteneciente al Programa de Maestría en Ciencias (Materiales Poliméricos) del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. fue realizado en los laboratorios de la Unidad de Materiales bajo la dirección del Dr. Ricardo Herbé Cruz Estrada.

Atentamente,



Dr. Oscar A. Moreno Valenzuela

Director Académico

Centro de Investigación Científica de Yucatán, AC.

Esta tesis se realizó en la Unidad de Materiales del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., bajo la dirección del Dr. Ricardo Herbé Cruz Estrada, y con el financiamiento del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

DEDICATORIAS

A mi familia, por todo el apoyo que me han dado durante el trayecto de esta etapa.

A mi madre María Jesús, por su amor incondicional, estímulo y apoyo durante toda la vida.

A mis amigos, por ofrecerme su amistad, cariño y confianza.

AGRADECIMIENTOS

- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la Beca No. 240301, otorgada para realizar mis estudios.
- Al Fondo Institucional de Fomento Regional para el Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación (FORDECYT) por el financiamiento otorgado para realizar el presente trabajo a través del proyecto 117315, “Fortalecimiento del aprovechamiento integral del cocotero”.
- Al Centro de Investigación en Corrosión de la Universidad Autónoma de Campeche, en particular al Dr. Javier Reyes, por las facilidades brindadas para el uso de sus instalaciones.
- A la Dra. Blondy Canto y a Yamily Burgos (Unidad de Biotecnología del Centro de Investigación Científica de Yucatán), por su ayuda en la parte microbiológica de este trabajo.
- A mi director de tesis Dr. Ricardo Cruz, al comité tutorial y a los revisores de tesis, por sus comentarios y consejos durante el desarrollo de este trabajo.
- Al personal técnico de la Unidad de Materiales del Centro de Investigación Científica de Yucatán por el apoyo brindado para el uso de los equipos utilizados para la elaboración de este trabajo, particularmente a Santiago Duarte, Rossana Vargas y Carlos Cupul .
- A mis compañeros de generación por brindarme su apoyo, cariño y amistad en el transcurso de esta etapa profesional, en especial a Irma, Carlos, Genaro y Edgar.
- A todos aquellos que de alguna u otra forma contribuyeron al desarrollo de este trabajo de tesis.

PRODUCTOS ACADÉMICOS Y PRESENTACIONES

- **Daniel Ramírez-Chan**, Ricardo Cruz-Estrada, Blondy Canto-Canché, Yamily Burgos-Canul, “**PREPARACIÓN DE UNA MATERIAL COMPUESTO CON FIBRAS DE BONOTE DE COCO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD RECICLADO Y EVALUACIÓN DE SUS PROPIEDADES MECÁNICAS Y RESISTENCIA AL ATAQUE DE *PHANEROCHAETE CHRYSOSPORIUM***”, Competencia de Carteles organizada por el Centro de Investigación Científica de Yucatán, Mérida, Yucatán, 7–8 de abril, 2011.
- **Daniel Ramírez-Chan**, Ricardo Cruz-Estrada, Carlos Cupul-Manzano, Blondy Canto-Canché, Yamily Burgos-Canul and Javier Reyes-Trujeque, “**EFFECT OF *PHANEROCHAETE CHRYSOSPORIUM* ATTACK ON MECHANICAL PROPERTIES OF A COMPOSITE PREPARED WITH COIR FIBERS AND RECYCLED HDPE**”, Proceedings of Second US-Mexico Meeting and XXIV SPM National Congress (Macromex 2011), December 7–10, 2011, Riviera Maya-Cancún, Mexico, pp. 287-291 (presentación oral).

ÍNDICE

Listado de tablas	3
Listado de figuras	4
Glosario de términos	7
Resumen	9
Abstract	11
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN	12
1.1 Alcance y estructura de la tesis	13
1.2 Perspectiva técnica	14
1.3 Objetivos	19
1.3.1 Objetivo general	19
1.3.2 Objetivos específicos	19
CAPÍTULO II CONCEPTOS FUNDAMENTALES	21
2.1 Polímeros	22
2.2 Polietileno	22
2.2.1 Estructura química	22
2.2.2 Propiedades físicas y químicas	23
2.3 Fibras naturales	25
2.3.1 Clasificación	25
2.3.2 Estructura y propiedades	25
2.3.3 Fibras de Coco	28
2.4 Materiales compuestos	29
2.4.1 Clasificación	31
2.4.2 Materiales compuestos con polímeros y fibras naturales	31
2.4.3 Aditivos para polímeros y materiales compuestos	33
2.4.4 Agente acoplante	34
2.5 Degradación	36

2.5.1 Degradación de los polímeros.....	36
2.5.2 Degradación biológica de los polímeros	37
2.5.3 Deterioro de la madera plástica.....	39
2.6 Envejecimiento de los materiales compuestos.....	42
2.6.1 Envejecimiento acelerado	42
2.7 Caracterización del material compuesto	43
2.7.1 Espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR)	43
2.7.2 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).....	44
2.7.3 Tipos de ensayos mecánicos	44
CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS EXPERIMENTALES	50
3.1 Materiales y reactivos	51
3.2 Parte experimental	53
3.2.1 Etapa I: Elaboración del material compuesto	53
3.2.2 Etapa II: Exposición de probetas a envejecimiento acelerado	57
3.2.3 Etapa III: Inoculación e incubación del material compuesto	58
3.2.4 Etapa IV. Caracterización del material compuesto	61
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIONES	63
4.1 Espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier	64
4.2 Pérdida de peso.....	70
4.3 Propiedades mecánicas	71
4.3.1 Ensayos de tensión	71
4.3.2 Ensayos de flexión.....	74
4.4 Microscopía electrónica de barrido	76
CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	81
5.1 Conclusiones	82
5.2 Recomendaciones	83
BIBLIOGRAFÍA	85

Listado de tablas

Tabla 1.1. Generación estimada de plásticos (miles de toneladas) en México de 2005 a 2009.....	15
Tabla 1.2. Porcentaje de superficie cultivada de cocotero por entidad a nivel nacional (año 2005).....	16
Tabla 2.1. Aditivos principales para la elaboración de materiales compuestos basados en polietileno.....	34
Tabla 3.1. Composición de la mezcla.....	54
Tabla 3.2. Número de probetas elaboradas para cada grupo.....	57
Tabla 4.1. Pérdida de peso en porcentaje para materiales de ambos grupos.....	71

Listado de figuras

Figura 1.1. Generación estimada de RSU en México por tipo de residuo (miles de toneladas) en 2009.....	15
Figura 1.2. Aplicaciones potenciales de materiales compuestos elaborados a partir de fibras de desechos naturales y matrices poliméricas.....	17
Figura 2.1. Estructura básica del polietileno.....	22
Figura 2.2. Sección representativa de la estructura molecular de a) celulosa y b) una hemicelulosa.....	27
Figura 2.3. Subestructuras de la lignina. a) α – hidroxifenol, b) Syringil, c) Guayacil.....	27
Figura 2.4. Partes que constituyen al coco.....	28
Figura 2.5. Componentes principales de un extrusor.....	32
Figura 2.6. Mecanismo de reacción de MAPE con el grupo hidroxilo de la fibra lignocelulósica.....	35
Figura 2.7. Esquema ensayo a tensión (F: carga aplicada, L0: longitud inicial).....	46
Figura 2.8. Curva típica esfuerzo vs deformación.....	47
Figura 2.9. Prueba de flexión en tres puntos (F: carga aplicada, L0: longitud inicial).....	49
Figura 3.1. Fibra de bonote de coco.....	51
Figura 3.2. Polietileno de alta densidad reciclado.....	51

Figura 3.3. Cepa del microorganismo <i>Phanerochaete chrysosporium</i>	52
Figura 3.4. a) Molino BRABENDER, TI 880804; b) Molino Pagani 1520; c) Tamizador Rotap modelo RX-29.....	53
Figura 3.5. Mezcladora de cinta marca Intertécnica con capacidad de 5 L.....	54
Figura 3.6. a) Extrusor de laboratorio marca BRABENDER; b) Equipo CW-BRABENDER 12-72-000.....	55
Figura 3.7. a) Molde para elaborar probetas de tensión; b) Prensa CARVER manual.....	56
Figura 3.8. a) Molde para elaborar placas (probetas flexión); b) Prensa CARVER automática (3891).....	57
Figura 3.9. Cámara de envejecimiento acelerado ATLAS/UVCON.....	58
Figura 3.10. Probeta para ensayos a flexión según ASTM D790.....	59
Figura 3.11. Probeta para ensayos a tensión según ASTM D638.....	60
Figura 3.12. Material inoculado. a): Probetas de tensión; b): Probetas de flexión.....	60
Figura 3.13. Máquina de pruebas universales INSTRON modelo 1125.....	62
Figura 4.1. Espectro IR para el material compuesto de referencia (T0SI).....	64
Figura 4.2. Amplificación del espectro IR de la Fig. 4.1 (región 1800 – 800 cm ⁻¹) para el material compuesto de referencia (T0SI).....	65
Figura 4.3. Comparación entre los espectros IR para materiales compuestos del grupo I (SI).....	66
Figura 4.4. Amplificación del espectro IR de la Fig. 4.3 (región 2000–1200 cm ⁻¹) para el material compuesto del grupo I (SI).....	67

Figura 4.5. Comparación entre los espectros IR para T0SI y T0CI (materiales de referencia).....	68
Figura 4.6. Comparación entre los espectros IR para materiales compuestos del grupo II (CI).....	69
Figura 4.7. Resistencias obtenidas de los ensayos a tensión para ambos grupos (SI y CI).....	72
Figura 4.8. Módulos elásticos obtenidos de los ensayos a tensión para ambos grupos (SI y CI).....	73
Figura 4.9. Resistencias obtenidas de los ensayos a flexión para ambos grupos (SI y CI).....	75
Figura 4.10. Módulos elásticos obtenidos de los ensayos a flexión para ambos grupos (SI y CI).....	76
Figura 4.11. Micrografías del material de referencia (T0SI): a) Superficie aparentemente lisa, b) Fisuras sobre la superficie del material.....	77
Figura 4.12. Micrografía de materiales expuestos a <i>Phanerochaete chrysosporium</i> (grupo I): a) T1SI, b) T2SI.....	78
Figura 4.13. Micrografía de material expuesto a envejecimiento acelerado (T0CI): a) Superficie agrietada del material, b) Exposición de la fibra de bonote de coco.....	78
Figura 4.14. Micrografía de materiales expuestos a <i>Phanerochaete chrysosporium</i> (grupo II): a) T1CI, b) T2CI.....	79
Figura 4.15. Micrografía del material correspondiente a T2CI que muestra la concentración de las hifas de <i>Phanerochaete chrysosporium</i>	80

Glosario de términos

- **Biocidas:** Productos destinados a destruir, neutralizar, impedir la acción o ejercer control sobre cualquier microorganismo dañino por medios químicos o biológicos. Algunos ejemplos son los desinfectantes, conservantes, pesticidas, herbicidas, fungicidas e insecticidas.
- **Copra:** Pulpa seca del coco de la cual se extrae el aceite de coco.
- **Enzimas:** Proteínas cuya acción biológica consiste en la catálisis de las reacciones del metabolismo, las cuales transcurrirían muy lentamente sin su intervención.
- **Hifas:** Filamentos tubulares que poseen una pared celular y en conjunto forman el micelio del hongo.
- **Hongos de pudrición:** Hongos xilófagos (capaces de degradar la madera/lignocelulósicos) que atacan la pared celular produciendo rotura y descomposición, principalmente, de lignina, celulosa y hemicelulosas, lo que ocasiona la disminución de la densidad de la madera y el incremento de la humedad. Pueden ser de pudrición blanca, café o blanda.
- **Propiedades anisotrópicas:** Las propiedades del material son diferentes en distintas direcciones en un punto dado, es decir, las propiedades del material son función de la dirección en un punto determinado.
- **Propiedades isotrópicas:** En los materiales isotrópicos las propiedades son las mismas en cualquier dirección en un punto dado, es decir, un

cuerpo isotrópico tendrá la misma propiedad del material en cualquier plano que pasa por un punto.

- Residuos sólidos urbanos (RSU): Aquellos que son generados en los domicilios particulares, comercios, oficinas y servicios, así como todos aquellos que no tengan la calificación de peligrosos y que por su naturaleza o composición puedan asimilarse a los producidos en los anteriores lugares o actividades.

Resumen

En este trabajo se elaboró un material compuesto por el método de extrusión utilizando 60% en peso de polietileno de alta densidad reciclado y 40% en peso de fibra de bonote de coco. Se estudió el efecto del hongo de pudrición blanca *Phanerochaete chrysosporium* sobre las propiedades mecánicas del material compuesto.

Se prepararon dos grupos de materiales, el primero fue expuesto directamente al hongo *P. chrysosporium* y el segundo grupo fue expuesto a envejecimiento acelerado inicialmente para luego ser inoculado con el hongo. El tiempo y las condiciones de incubación en presencia del hongo fueron los establecidos en el método estándar ASTM G21. Se evaluó el efecto del microorganismo sobre las propiedades mecánicas del material antes y después de ser expuesto a envejecimiento acelerado. Para esto se realizaron ensayos de tensión y flexión de acuerdo a métodos estándar ASTM D638 y D790, respectivamente. Para determinar la presencia de grupos funcionales que fueran resultantes de la degradación del material se utilizó Espectroscopía de Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR). La técnica de Microscopía con Electrónica de Barrido (MEB) fue utilizada para analizar la superficie del material, antes y después del bioensayo con *P. chrysosporium*. Adicionalmente, se determinó el porcentaje de pérdida de peso debido al efecto del hongo.

Después de exponer los materiales de ambos grupos (con y sin tratamiento de envejecimiento acelerado) a la prueba de resistencia al ataque biológico con *P. chrysosporium* se observó un bajo porcentaje de pérdida de peso (menor a 2.5%). El hongo *P. chrysosporium* afectó de manera superficial al material, ya que se encontraron indicios de biodegradación en los análisis químico y

morfológico. Las propiedades mecánicas del material evaluado resultaron afectadas en menor proporción por el ataque biológico ya que la disminución no fue mayor al 25%, lo cual suele ser aceptable para este tipo de materiales.

Abstract

The present work deals with the preparation of composites by extrusion with 60% of recycled HDPE and 40% of coir. It was studied the effect of white – rot fungus *Phanerochaete chrysosporium* on the materials' mechanical properties.

Two sets of specimens were prepared; the first one was directly inoculated with *P. chrysosporium* without exposure to accelerated weathering. The second one was exposed to accelerated weathering previously and then inoculated with *P. chrysosporium*. The conditions and incubation period were done according to ASTM G21 test method. It was evaluated the effect of *P. chrysosporium* on the materials' mechanical properties, before and after subjecting them to weathering by using an accelerated test device. Tensile and flexural mechanical performance was evaluated according to the D638 and D790 ASTM standard. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) analyses were carried out to provide information on the presence of functional groups as a result of materials' degradation. Scanning Electron Microscopy (SEM) was used to analyze the composites surface before and after biological exposure. Also, weight loss by the effect of *P. chrysosporium* was calculated.

Weight loss lower than 2.5% were observed for both sets (with accelerated weathering and without it) of specimens after exposure to resistance test of *P. chrysosporium*. Fungus affected the surface of the composite, which was corroborated by the results of chemical and morphological analyses. The reduction in mechanical properties due to inoculation with *P. chrysosporium* was acceptable for these types of materiales (< 25%).

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

1.1 Alcance y estructura de la tesis

El presente trabajo trata sobre la preparación de un material compuesto a base de fibra de bonote de coco y polietileno de alta densidad reciclado (HDPE), la evaluación de sus propiedades mecánicas, y cómo el hongo de pudrición blanca, *Phanerochaete chrysosporium*, puede afectarlo. Este tipo de materiales compuestos poseen diversas aplicaciones en las que pueden ser expuestos a ambientes propicios para el crecimiento de este tipo de microorganismo, lo que podría causar una disminución en sus propiedades mecánicas.

Como materias primas se utilizaron la fibra de bonote de coco de la variedad Alto Pacífico 2 (ecotipo MXPT2) y HDPE reciclado de una empresa recicladora de Mérida. Se experimentó a nivel laboratorio para obtener por extrusión materiales compuestos con composiciones de 40% en peso de fibra de bonote de coco. Se elaboraron dos lotes de material, el primero fue expuesto directamente a *P. chrysosporium*; el segundo lote fue expuesto primero a condiciones de envejecimiento acelerado y luego al hongo. Posteriormente se evaluaron ambos lotes mecánica, química y morfológicamente.

Para mayor facilidad de lectura, esta tesis está dividida en cinco capítulos. El **Capítulo 1** describe las características y estructura de la tesis y ofrece un panorama de la problemática a tratar y el objeto de estudio. En el **Capítulo 2** se encuentra la información teórica en la que se fundamenta este trabajo de tesis; en tanto que en el **Capítulo 3** se describe la metodología que se empleó para cubrir los objetivos del trabajo. El **Capítulo 4** describe los resultados obtenidos durante el desarrollo de la investigación y se hace una discusión de

los mismos. Por último, en el **Capítulo 5** se presentan las conclusiones y recomendaciones que se sugieren para la continuación de este proyecto. También se anexa un glosario de términos técnicos para facilitar la comprensión de este estudio.

Para fines prácticos las referencias bibliográficas utilizadas en este trabajo se encuentran enumeradas según el orden de aparición utilizando superíndices con números entre corchetes y se presentan al final de esta tesis.

1.2 Perspectiva técnica

Los residuos sólidos urbanos (RSU) constituyen una de las fuentes principales de contaminación a nivel mundial y local; su excesiva acumulación se relaciona con el aumento de población y el incremento de productos desechables ^[1]. Debido a esto, tanto dependencias gubernamentales como del sector privado, con ayuda de la tecnología actual, están en busca de nuevos materiales que generen un mínimo de residuos en los procesos de fabricación. Una alternativa para resolver este problema es utilizar materiales de desecho que puedan ser transformados en productos útiles para la industria y la sociedad.

El plástico representa un 7% del peso total de la basura doméstica y ocupa entre el 20 y el 30% en las naciones industrializadas. Cada año se fabrican en el mundo cerca de 100 millones de toneladas ^[2]. En el 2009 se generaron en México 4 173.6 miles de toneladas de plástico, que representó el 10.89% del total de RSU generados en ese año (Fig 1.1). Esto representa un incremento en la generación de RSU en nuestro país al pasar del 6.03% en el 2007 al 10.89% en el 2009, como se observa en la Tabla 1.1 ^[3]. La materia prima es el

petróleo, un recurso no renovable; y existen registrados cerca de 50 tipos diferentes de plásticos, los cuales se reciclan muy poco.

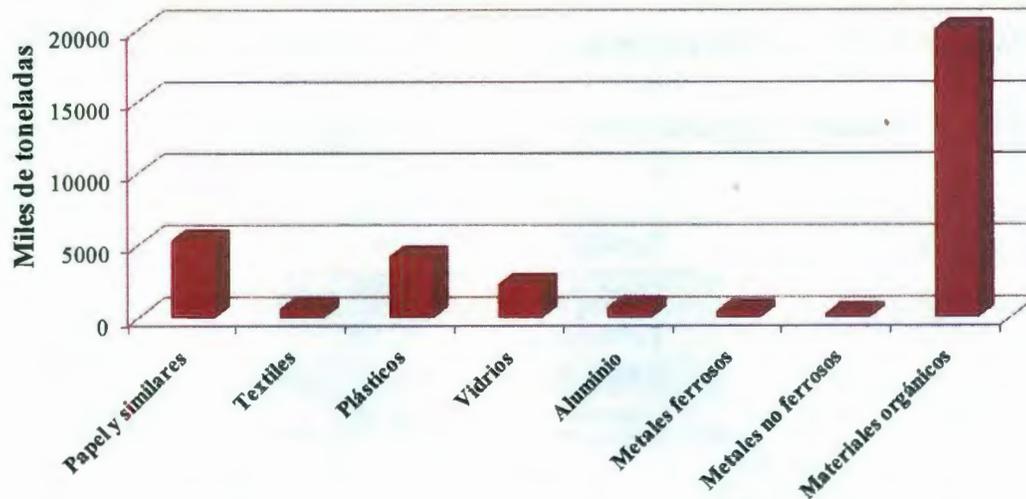


Figura 1.1. Generación estimada de RSU en México por tipo de residuo (miles de toneladas) en 2009 ^[3].

Tabla 1.1. Generación estimada de plásticos (miles de toneladas) en México, de 2005 a 2009 ^[3].

Año	Cantidad de Plásticos (miles de toneladas)	Total RSU (miles de toneladas)	% Plásticos
2005	2 161.80	3 5405.00	6.11
2006	2 208.00	3 6135.00	6.11
2007	2 223.00	3 6865.00	6.03
2008	4 094.10	3 7595.00	10.89
2009	4 173.60	3 8325.00	10.89

Por otro lado, existen grandes cantidades de materiales de desecho naturales que se desperdician, los cuales poseen diversas características de interés en diferentes ramos del sector industrial, por lo que deberían aprovecharse para proporcionarles valor agregado. Un caso típico son los subproductos que se generan del cocotero en nuestro país. Al respecto, la superficie plantada en

los litorales tropicales de México es de 148 mil hectáreas, de las cuales el 94% se destinan a la producción de copra. La superficie cultivada en el país está principalmente en sus litorales tropicales siendo las entidades de Guerrero, Tabasco y Colima donde se encuentra el mayor porcentaje (Tabla 1.2) ^[4].

Tabla 1.2. Porcentaje de superficie cultivada de cocotero por entidad a nivel nacional (año 2005) ^[4].

Entidad	%
Guerrero	51.96
Tabasco	17.03
Colima	14.53
Otros	16.48

De la industria del cocotero dependen alrededor de 70 mil familias y anualmente se producen 216 mil toneladas de copra, de donde se extrae el aceite que se destina principalmente a la industria de jabones y cosméticos ^[4]. Desafortunadamente, en general, los comerciantes de coco consideran como basura al bonote (o estopa) y el huesillo, y a esto se agregan los crecientes costos de transporte, flete y carga, descarga, etc. ^[5]. Se sabe que las fibras del bonote desechadas, una vez que al fruto se le ha extraído el agua y la pulpa, poseen en general buenas propiedades mecánicas, por lo que podrían aprovecharse para la fabricación de diferentes productos ^[2, 6-9].

Una de las alternativas de reciclaje está en la fabricación de productos a partir de materiales compuestos hechos a base de fibras naturales y plásticos, sector que ha tenido un rápido crecimiento en el mercado de la construcción y mobiliarios de más del 25% desde 1998 ^[10].

Debido a lo mencionado en los párrafos anteriores, el presente estudio trata sobre la preparación de materiales compuestos empleando HDPE reciclado y fibras de bonote de coco. Las aplicaciones potenciales para el material en desarrollo comprenden el sector de la construcción, jardinería y mobiliario para exteriores e interiores y decoración, entre otros (Fig. 1.2). Se espera que esto contribuya a contrarrestar los problemas asociados a la generación y acumulación desmedida de RSU en nuestro país, al mismo tiempo que promueva el uso de estos tipos de residuos en la creación de nuevos materiales, proporcionándoles así un mayor valor agregado [1, 2, 8, 9].



Figura 1.2. Aplicaciones potenciales de materiales compuestos elaborados a partir de fibras de desechos naturales y matrices poliméricas.

Con respecto a los materiales elaborados con plásticos, se sabe que en general estos últimos son resistentes al ataque de microorganismos; sin embargo, las fibras naturales son susceptibles a la degradación biológica por hongos [11]. De esta manera, algunos materiales compuestos hechos a base de fibras naturales y plásticos pueden ser afectados, ya que reúnen las condiciones para que estos hongos puedan subsistir, por lo que es importante estudiar su afectación en las

propiedades del material. Los factores que favorecen su crecimiento son los siguientes ^[12-14].

- Una fuente de alimento (fibra de celulosa, plastificantes y otros aditivos que sean consumibles por los microorganismos).
- Factores químicos (carbohidratos, metales, minerales y otros nutrientes).
- Oxígeno (para microorganismos aerobios).
- Agua (contenido de humedad: 20-30%)
- Temperatura favorable (15–40°C)
- Intervalo de pH favorable (ligeramente ácido)

Si los materiales propuestos en este trabajo quisieran emplearse en el Estado de Yucatán, deberá tomarse en cuenta que en esta entidad se tiene una humedad relativa promedio de 76%, y un clima cálido sub-húmedo cuya temperatura puede superar los 36°C en período de verano y alcanzar la precipitación pluvial de 1100 mm en el período comprendido entre junio y octubre ^[15, 16].

Lo anterior indica que las propiedades de un material compuesto reforzado con fibra de bonote de coco podrían ser afectadas por todos estos factores cuando se encuentren en uso en exteriores, ya que el clima de la región promueve que se den las condiciones necesarias para que sufran deterioro microbiológico que afecte la calidad y la eficiencia de los materiales.

En este trabajo se pone especial atención al estudio del efecto que ejercen los microorganismos sobre la fibra del bonote de coco, particularmente el hongo de pudrición blanca *Phanerochaete chrysosporium*, ya que existen reportes que indican que este hongo ligninolítico afecta las propiedades de la fibra de bonote de coco [17-24].

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Preparar un material compuesto con fibras de bonote de coco y HDPE reciclado y evaluar sus propiedades mecánicas antes y después de exponerlo a envejecimiento acelerado y al ataque de *Phanerochaete chrysosporium*.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Elaborar, mediante extrusión, materiales compuestos con HDPE reciclado y de fibra de bonote de coco (40% en peso).
2. Determinar las propiedades mecánicas, tensión y flexión, de los materiales compuestos elaborados sin haber sido inoculados con *P. chrysosporium*.
3. Exponer los materiales compuestos obtenidos a envejecimiento acelerado para simular condiciones normales de intemperismo.
4. Exponer los materiales compuestos, sometidos a las condiciones señaladas en el objetivo 3, al ataque biológico de *P. chrysosporium*.
5. Evaluar mediante FTIR y MEB el efecto del ataque biológico de *P. chrysosporium* en la superficie de los materiales compuestos bajo las condiciones mencionadas en el objetivo 3.

-
6. Determinar el efecto de *P. chrysosporium* sobre las propiedades mecánicas de los materiales compuestos en ensayos de tensión y flexión.
 7. Determinar cuál es el mecanismo probable que explique la pérdida de las propiedades mecánicas por el ataque biológico en caso de que éste exista.

CAPÍTULO II

CONCEPTOS

FUNDAMENTALES

2.1 Polímeros

Los polímeros son macromoléculas constituidas por un gran número de moléculas más pequeñas conocidas como monómeros. Los monómeros se combinan entre sí para formar moléculas de polímero, y las reacciones por las cuales se combinan se llaman polimerizaciones. Hay cientos, miles, cientos de miles o más de moléculas de monómero que se encuentran entrelazadas en un polímero. Cuando se habla de polímeros, se refiere a materiales cuyos pesos moleculares pueden alcanzar cientos de miles o millones g/mol ^[25, 26].

2.2 Polietileno

2.2.1 Estructura química

En la industria tienen especial importancia los polímeros y copolímeros de las olefinas, concretamente del etileno y propileno, cuyo uso se ha extendido en mayor grado en comparación con otros tipos de materiales termoplásticos.

Existen dos tipos fundamentales de polietilenos, el de baja densidad (LDPE) y el de alta densidad (HDPE), aunque para cada uno de ellos existe una gama enorme de grados. Los procedimientos de obtención de ambos tipos son distintos y sus propiedades físicas y químicas también difieren de forma notable, como consecuencia de una diferente estructura molecular. En la Fig. 2.1 se presenta la estructura del polietileno.

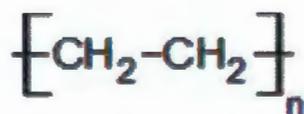


Figura 2.1. Estructura básica del polietileno.

El peso molecular promedio del LDPE es del orden de 10 000 – 40 000 g/mol, mientras que el de HDPE es mucho mayor (20 000 a 3 000 000 g/mol).

Adicionalmente a esta diferencia, se ha podido comprobar experimentalmente (por espectroscopia con infrarrojo), que el número de grupos terminales metilo ($-CH_3$) por cada cien átomos de carbono, es mucho mayor en el LDPE que lo que correspondería, teniendo en cuenta su menor peso molecular, en comparación con el HDPE. Ello quiere decir que la estructura molecular del primero es de cadenas parafínicas muy ramificadas, mientras la del segundo es más lineal.

La mayor linealidad estructural de las macromoléculas de HDPE permite un mayor empaquetamiento, dando lugar a un material de mayor densidad. Las cadenas moleculares se entrelazan dando lugar a zonas ordenadas en las que existe un cierto paralelismo mutuo (con fuertes interacciones moleculares) y a zonas desordenadas, en las que, por no existir este paralelismo, estas interacciones son más reducidas. Las zonas en las que las moléculas quedan orientadas paralelamente son cristalinas, mientras que las que no disponen de un ordenamiento definido son amorfas. La presencia de ramificaciones etílicas y butílicas, se comportan como amorfas ^[26, 27].

2.2.2 Propiedades físicas y químicas

Tanto los polietilenos como el prolipropileno presentan una elevada resistencia a los productos químicos, a excepción de los halógenos libres, ácidos oxidantes y ciertas cetonas, siendo insolubles en el resto de los disolventes a temperatura ambiente. Sin embargo, en ciertos casos se produce hinchamiento, con su correspondiente aumento de peso, que con los hidrocarburos llega hasta un 13% para el LDPE, y al 6% para el HDPE, cuando la inmersión dura 30 días a la temperatura ambiente. La mayor resistencia a la solvatación del HDPE frente a los LDPE es debida al mayor

empaquetamiento de sus macromoléculas que dificulta la difusión de las moléculas del disolvente en su interior.

Las poliolefinas son extremadamente resistentes al agua sin que se produzca ningún hinchamiento. La inercia química y el carácter no polar de las poliolefinas dificultan la unión mediante pegamentos de piezas fabricadas con estos materiales, y también dificulta la adherencia de tintas de impresión y recubrimientos. Este comportamiento puede mejorarse con tratamiento previos de activación. Las poliolefinas son fácilmente combustibles y arden con llama poco brillante, desprendiendo gotas de material inflamado. Para determinadas aplicaciones se comercializan algunos tipos de poliolefinas, denominadas incombustibles, con alta concentración de inertes y aditivos retardadores de la flama.

El alto grado de cristalinidad de las poliolefinas, en especial del HDPE, le proporciona pseudomódulos de alta elasticidad con gran flexibilidad y alta resistencia al impacto a temperatura ambiente ^[26].

Las poliolefinas se trabajan con todas las técnicas de transformación propias de los materiales termoplásticos; el efecto de la presión en la plastificación del material es superior al de la temperatura, por lo que las máquinas empleadas deben aplicar presiones muy elevadas (del orden de 700 kg/cm²) como mínimo, pero las temperaturas no deben ser demasiado bajas para evitar tensiones residuales.

De igual forma, presentan características eléctricas que, junto con su prácticamente nula permeabilidad frente al agua, las hacen especialmente

adecuadas para ser utilizadas en el aislamiento de cables eléctricos incluso para muy altos voltajes ^[26, 27].

2.3 Fibras naturales

2.3.1 Clasificación

Los parámetros físicos que describen una fibra son su longitud, su diámetro y su aspecto o esbeltez, que es la relación existente entre la longitud y el diámetro ^[9].

Según su origen, las fibras pueden ser clasificadas en sintéticas y naturales. Entre las sintéticas se encuentran las que son hechas por el hombre, que provienen básicamente del petróleo y gas natural, como el propileno, polietileno, dacrón, rayón, nylon, entre otras; las naturales son de origen vegetal (fibras de madera, hojas, semillas, hierbas), de origen animal (lana y pelo, seda y otros filamentos) y de origen mineral (fibras de asbesto); todas ellas tienen diversas formas: redondas, rectangulares, dentadas, rizadas, etc.

Las fibras naturales son más baratas, más rígidas y más resistentes que muchos polímeros sintéticos, lo que las convierte en excelentes candidatas para funcionar como relleno o refuerzo de materiales compuestos. Sin embargo, algunas de sus características, como la absorción de agua, pueden ser perjudiciales, de manera que para poder usarlas eficientemente como relleno o refuerzo en esos polímeros, es importante entender muy bien su comportamiento ^[12, 13].

2.3.2 Estructura y propiedades

Las fibras naturales están constituidas por ligamentos fibrosos, que a su vez se componen de microfibrillas dispuestas en grupos de diferentes espesores y

ángulos de orientación, que son ricos en celulosa. La región central de la fibra puede presentar una cavidad denominada lacuna. Las lacunas y los lúmenes son responsables de la gran incidencia de poros permeables en las fibras, ya que absorben una elevada cantidad de agua [9].

La fibra natural posee una estructura compleja y tridimensional. Los componentes principales en la estructura de las fibras naturales son los polímeros naturales lignina, celulosa y hemicelulosas que le proporcionan diferentes propiedades a los polímeros al combinarse con las fibras, por lo que son candidatas ideales para ser utilizadas en materiales compuestos [6, 7, 12]. Estos tres polímeros naturales contienen grupos hidroxilo y están distribuidos por toda la pared celular.

La celulosa es el principal componente que provee la resistencia y la estabilidad estructural a las fibras naturales. Las hemicelulosas están compuestas de cadenas poliméricas entrelazadas de varios azúcares de 5 y 6 carbonos, cuyos pesos moleculares son inferiores a los de la celulosa pero aún así contribuyen como componente estructural de la fibra natural (Fig. 2.2).

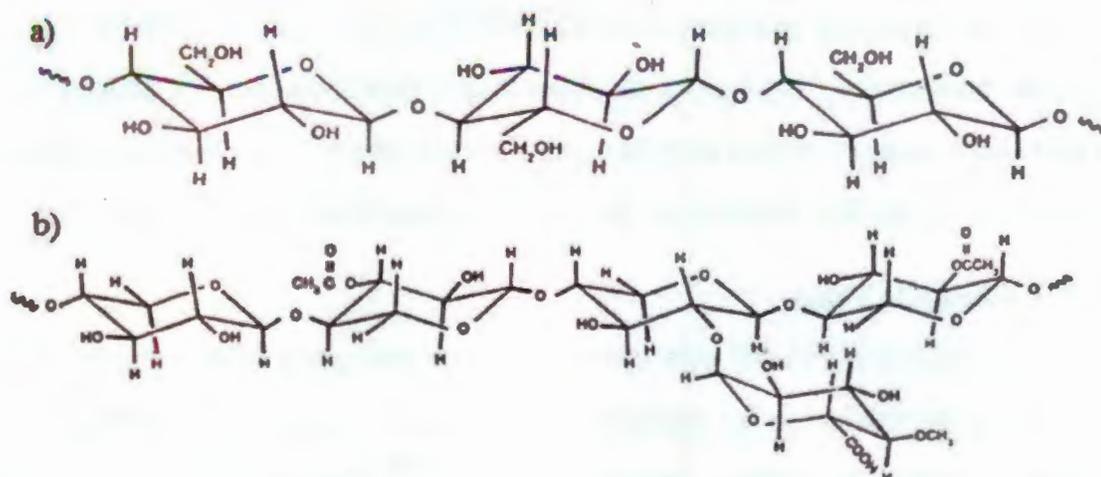


Figura 2.2. Sección representativa de la estructura molecular de a) celulosa y b) una hemicelulosa.

La lignina es una red polimérica entrecruzada, amorfa, con un arreglo irregular de varias unidades de fenil-propano que contienen grupos metoxi e hidroxil sustituidos (Fig. 2.3). La estructura química varía según la fuente [28, 29]. La lignina es menos polar que la celulosa y por ello actúa como un adhesivo químico dentro y entre las fibras de celulosa. La lignina es el principal constituyente en las fibras naturales responsable de la rigidez de las fibras y de la protección de la celulosa contra la degradación química y biológica [13].

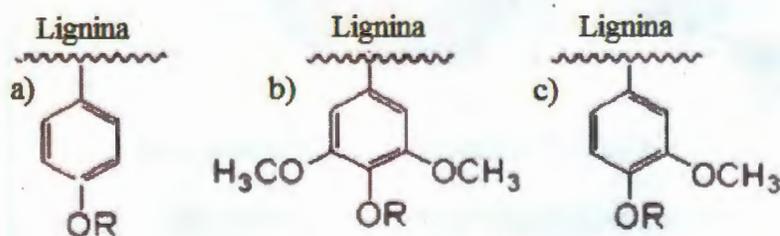


Figura 2.3. Subestructuras de la lignina. a) α - hidroxifenol, b) Syringil, c) Guayacil.

Las fibras naturales poseen una estructura eficiente que les confiere rigidez, fuerza, resistencia y bajo peso, de manera que funcionan para el transporte de humedad lo cual es crítico para la supervivencia de un árbol. Su disponibilidad y bajo costo, las han hecho muy útiles como materiales estructurales [14].

2.3.3 Fibras de Coco

El coco (*Cocos nucifera*) está constituido por una parte blanda interior y un líquido, a los cuales se les realizan procesos industriales para la obtención de grasas, aceites comestibles, confites y copra [30]. Sin embargo, también está constituido por la estopa, bonote o mesocarpio, que se encuentra entre el exocarpio o cubierta externa, y el endocarpio o envoltura dura, que encierra la semilla (Fig. 2.4). El valor del mesocarpio estriba en su contenido de fibra (fibra bonote), ya que este material puede tener varios usos entre los cuales se encuentra la elaboración de materiales compuestos [6, 9, 17, 30].



Figura 2.4. Partes que constituyen al coco.

La apariencia externa del bonote varía, es de color café cuando está totalmente maduro y de color verde cuando es inmaduro. El bonote está envuelto de fibras que van en una sola dirección y es poroso por lo que absorbe o retiene humedad, además de que es rico en lignina. La lignina es otro de los

principales constituyentes de esta fibra y es responsable de la rigidez de la cáscara del coco así como del color natural de la fibra ^[17, 31], y representa entre el 30% y el 45% de la fibra de coco ^[24, 31, 32]. La degradación de la lignina en la fibra de bonote se da principalmente por sistemas ligninolíticos que pueden provocar una pérdida en peso de celulosa y un deterioro en sus propiedades ^[17-24].

La fibra de coco pertenece a la familia de las fibras duras como las del henequén. Se trata de una fibra compuesta por celulosa y leño que posee baja conductividad al calor, resistencia al impacto, a las bacterias y al agua. Su resistencia y durabilidad la convierte en un material adecuado para el mercado de la construcción o para usarlo como material de aislamiento térmico y acústico. La industria textil utiliza fibra de coco para la industria artesanal basada en la cáscara y fibra del coco, para hacer desde vajillas completas, botones y tapetes, hasta jardineras y canastos. Estas fibras no son electrostáticas, son inodoras, son resistentes a la humedad, presentan una conductividad térmica entre 0.043 y 0.045 W/m^oK y no suelen ser atacadas por roedores o termitas ^[8].

2.4 Materiales compuestos

Se define como material compuesto todo sistema o combinación de materiales insolubles entre sí, constituido a partir de una unión (no química) de dos o más componentes con propiedades características, que da lugar a uno nuevo con propiedades específicas ^[33, 34].

Podemos identificar dos fases: una continua, constituida por la matriz, y otra fase discontinua o dispersa, denominada refuerzo o relleno según sea el caso.

Los componentes de un material compuesto no deben disolverse ni fusionarse completamente unos con otros. Los diferentes materiales deben poder distinguirse por medios físicos. Las propiedades del nuevo material dependen, entonces, del tipo de interfase y de las características de los componentes. Además del refuerzo y la matriz, existen otros tipos de componentes como cargas y aditivos que dotan a los materiales compuestos de ciertas características para cada tipo de fabricación y aplicación ^[33].

Los materiales compuestos se pueden seleccionar para obtener combinaciones no usuales de rigidez, peso, desempeño a alta temperatura, resistencia a la corrosión, dureza o conductividad. En los materiales compuestos son importantes las propiedades y las fracciones volumétricas de cada fase individual; también es muy importante la conectividad entre las fases. Así, el término “matriz metálica” indica un material metálico utilizado para formar la fase continua. La conectividad se refiere a la forma en que dos o más fases están interconectadas en el material compuesto. Los materiales compuestos suelen clasificarse en función de la forma o la naturaleza de la fase dispersa (por ejemplo, materiales compuestos reforzados con partículas, filamentos o fibras). Los filamentos son como las fibras, aunque su tamaño es mucho más pequeño. La unión entre las partículas, filamentos o fibras y la matriz también es muy importante. En algunos materiales compuestos estructurales se utilizan moléculas, que pueden ser poliméricas, conocidas como agentes de acoplamiento. Estas moléculas forman enlaces con la fase dispersa y se integran también en la fase continua ^[34].

2.4.1 Clasificación

Los materiales compuestos se pueden clasificar en tres grupos: particulados, fibro-reforzados y laminados, con base en la forma física de la materia prima. Por ejemplo el concreto, una mezcla de cemento y de grava, es un material compuesto particulado; la fibra de vidrio embebida en un polímero, da lugar a un material compuesto fibro-reforzado, y el “triplay” o madera contrachapada, con capas alternas de chapa de madera, es un compuesto laminado. Si las partículas de refuerzo están uniformemente distribuidas, los materiales compuestos particulados tienen propiedades isotrópicas; los materiales compuestos con fibras pueden ser isotrópicos o anisotrópicos; los compuestos laminados siempre tienen un comportamiento anisotrópico ^[33].

2.4.2 Materiales compuestos con polímeros y fibras naturales.

Tanto las fibras naturales como los polímeros sintéticos son materiales muy importantes, cada uno con ventajas y desventajas, especialmente con respecto a la durabilidad, propiedades mecánicas, hinchamiento del material, resistencia térmica y disponibilidad. El proceso de elaboración de materiales compuestos ofrece la oportunidad de combinar estos materiales aunque el sistema debe de cumplir con ciertos requisitos para poder obtener un material con excelentes propiedades.

La tecnología de producción se ha ido desarrollando en la industria del plástico, así que la maquinaria debe adaptarse a los requerimientos especiales de cada tipo de fibra. Cuando se usan fibras de madera para preparar materiales compuestos poliméricos es muy importante definir y especificar las cualidades de la fibra ^[12].

La extrusión es uno de los métodos más empleados para la fabricación de materiales compuestos reforzados con fibras naturales. Esto se debe, en parte, a los requerimientos de las aplicaciones del mercado actual para elementos continuos lineales. Un extrusor está formado por un eje metálico central con álabes helicoidales llamado husillo o tornillo sin fin, instalado dentro de un cilindro metálico revestido con una camisa de resistencias eléctricas sujetado en uno de sus extremos a un cojinete de empuje que lo une al motor eléctrico (Fig. 2.5). La mayoría de los tornillos de extrusión cuentan con tres zonas diferentes, las cuales se denominan: zona de alimentación, zona de compresión (o transición) y zona de dosificación (o de bombeo).

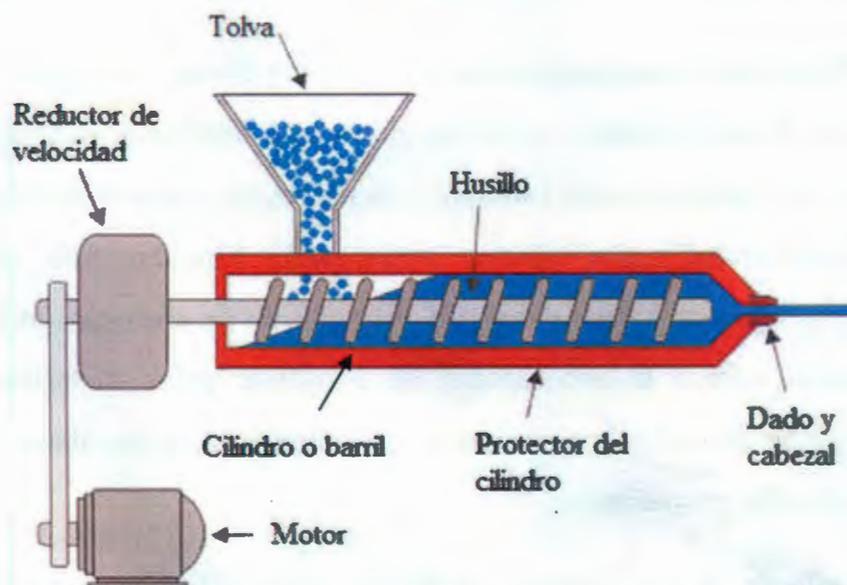


Figura 2.5. Componentes principales de un extrusor.

Los extrusores pueden ser mono-husillos o de doble-husillo. Los de doble-husillo ofrecen una amplia variedad de opciones en la colocación del husillo, rotación direccional y la forma del barril. Ambos husillos pueden embonarse o pueden ser independientes entre sí. El empleo de extrusores con husillos

embonados permite tener una mejor distribución de los componentes del material compuesto.

Los métodos de extrusión son diversos en la industria. Sin embargo, el proceso comercial sigue dos plataformas de fabricación: la extrusión directa y la extrusión pre-compuesta. En la extrusión directa, la materia prima es mezclada en seco y alimentada al extrusor, en tanto que la extrusión pre-compuesta se requiere que los componentes sean mezclados y fundidos antes de fabricar los materiales compuestos en diferentes formas ^[12, 35, 36].

2.4.3 Aditivos para polímeros y materiales compuestos

Actualmente en la industria del plástico existen cerca de 100 tipos de familias de polímeros, por lo cual se tiene un amplio intervalo de propiedades a escoger para la elaboración de diferentes productos ^[37].

Muchos de los productos requieren de una amplia variedad de propiedades y un balance de las mismas; por ello la selección de los aditivos adecuados así como del tipo de procesamiento y materias primas, juegan un papel importante para el éxito del producto final ^[12, 37, 38].

Algunos de los aditivos más importantes para la elaboración de materiales compuestos con polietileno como matriz polimérica se mencionan en la Tabla 2.1 ^[12].

Tabla 2.1. Aditivos principales para la elaboración de materiales compuestos basados en polietileno ^[12].

Función	Material	Intervalo recomendado (%)
Agente acoplante	Poliolefina injertada con anhídrido maleico	2 – 5
Lubricante	Estearatos/ esterés / otros.	3 – 8
Antioxidantes	Compuestos fenólicos/ Fosfitos	0 – 1
Protección UV	Benzofenonas/ Benzotriazoles	0 – 1
Biocida	Borato de Zinc	0 – 2
Retardantes a la flama	Varios	Según aplicación

2.4.4 Agente acoplante

Cuando se dispersa el refuerzo o relleno en la matriz polimérica la interfase física que se forma entre estos es débil debido a la diferencia en los módulos de elasticidad, expansión térmica, polaridad, atracción química y reactividad. Por lo cual se presentan los siguientes problemas ^[37]:

- La dispersión del relleno o refuerzo en la matriz es difícil, lenta e incompleta.
- La resistencia máxima es limitada por alguna falla prematura en la débil interfase.
- La resistencia al impacto es críticamente inferior.
- Los ciclos térmicos durante el procesamiento producen desajustes en la interfase, lo que lleva a una falla prematura.

- La pigmentación con colorantes es ineficiente y cara.
- La humedad ataca la interfase selectivamente, causando hidrólisis y una falla prematura.

Estos problemas pueden resolverse utilizando agentes acoplantes o compatibilizantes que fortalezcan la interfase.

Cuando se utiliza una matriz de polietileno, el agente acoplante más común utilizado hoy en día es el polietileno injertado con anhídrido maleico (MAPE, por sus siglas en inglés). En la Fig. 2.6 se observa el mecanismo de reacción del polietileno con la superficie de una fibra lignocelulósica. Primero el extremo de la cadena del MAPE reacciona con un grupo hidroxilo de la superficie del material lignocelulósico y forma un enlace éster. Luego se forma un enlace químico entre la fibra hidrofílica y el termoplástico hidrofóbico fundido ^[39].

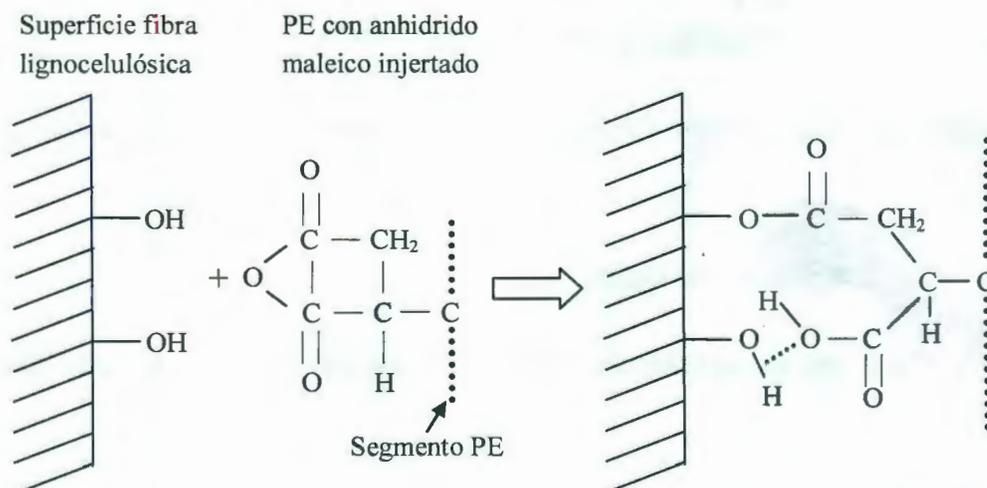


Figura 2.6. Mecanismo de reacción de MAPE con el grupo hidroxilo de una fibra lignocelulósica.

2.5 Degradación

2.5.1 Degradación de los polímeros

Los polímeros sintéticos y naturales experimentan, al paso del tiempo, una pérdida progresiva de sus propiedades estéticas, mecánicas, químicas, térmicas, etc. Esta degradación se caracteriza porque se llevan a cabo reacciones que modifican la estructura de las cadenas moleculares provocando rompimientos de cadena, entrecruzamiento, modificaciones de la estructura química de la cadena principal, de las ramificaciones y combinaciones de estas reacciones ^[40].

Generalmente, estas reacciones suceden cuando los polímeros son expuestos al medio ambiente, a agentes químicos, o son sometidos a esfuerzos mecánicos. La degradación de los materiales expuestos al medio ambiente es acelerada por el calor y la radiación UV, pero también intervienen otros factores como la humedad, el ozono o la contaminación ambiental, que pueden aumentar la velocidad de degradación ^[7, 12, 13, 35, 36, 39].

En general, la degradación de los materiales se manifiesta de la siguiente manera:

- ✓ Cambios o pérdida de color.
- ✓ Cambios en la apariencia superficial (grietas, manchas, pérdida de brillo).
- ✓ Modificación en las propiedades mecánicas (resistencia a la tensión o al impacto).
- ✓ Ruptura completa de la estructura.

2.5.2 Degradación biológica de los polímeros

El alto peso molecular de los polímeros, los convierte en materiales altamente hidrofóbicos y, por lo tanto, muy resistentes al ataque microbiano directo. Sin embargo, una reducción de la cadena polimérica incrementaría la accesibilidad microbiana, lo que permitiría la biodigestión del material. Una vez que la estructura molecular puede ser reducida a oligómeros o cadenas más cortas, esto facilitará el acceso de los microorganismos al carbono y así el material será consumido hasta formar CO₂, agua y otros metabolitos ^[41].

Degradación de los componentes de una fibra natural

La lignina es un polímero natural amorfo que actúa como agente aglutinante entre los componentes del vegetal y está constituido por unidades del tipo fenilpropano. La lignina se origina por la polimerización deshidrogenativa al azar de alcoholes p-hidroxicinámicos. La lignina es el segundo constituyente en peso (15 – 30%) y en importancia del reino vegetal ^[42-45].

Estudios previos muestran que de la degradación de los lignocelulósicos se obtienen compuestos fenólicos como ácidos cumáricos, sinápico y cafeicos, compuestos que son monómeros de la molécula de la lignina ^[46].

La lignina es químicamente heterogénea y tiene una estructura muy compleja. Los monómeros son todos derivados del fenilpropano y su complejidad resulta del gran número de diferentes enlaces que unen a los monómeros. La diferencia en la composición de las ligninas se manifiesta en el contenido de grupos metoxi; por ejemplo: 21% en árboles de hojas caducas, 16% en abeto y 14% en gramíneas ^[47].

De todos los grupos de microorganismos ligninolíticos, los *Basidiomycetes* de pudrición blanca son, probablemente, los más eficientes y los más estudiados. Estos son los únicos microorganismos que poseen la capacidad de degradar lignina completamente a CO₂ y H₂O [47, 48]. Entre esta clase de hongos se encuentra *Phanerochaete chrysosporium*, uno de los más eficaces para depolimerizar la compleja estructura de la lignina, lo cual posibilita el ataque de los polisacáridos que constituyen una importante fuente de energía para el hongo [49, 50].

La degradación de la lignina es de naturaleza oxidativa y es realizada por un conjunto de enzimas agrupadas conocidas como enzimas ligninolíticas o peroxidasas ligninolíticas, las cuales catalizan la oxidación usando peróxido de hidrógeno (este proceso ha sido identificado como una reacción clave en el proceso degradativo de la lignina). Entre estas enzimas se tienen tres tipos principales: lignina peroxidasa (LiP), manganasa peroxidasa (MnP) y peroxidasa independiente de manganeso. En el proceso ligninolítico también es importante la actividad de enzimas lacasas [42-45, 51, 52].

Estas enzimas pueden actuar individualmente o sinérgicamente aumentando la degradación de la lignina [52]. Las isoenzimas de la MnP y de la lacasa varían de acuerdo a la composición del medio de crecimiento y la concentración de los sustratos: sin manganeso no se detecta la actividad de la MnP, y en medios de cultivo sin cobre la cantidad de lacasa es insignificante. La enzima MnP es una de las principales oxido-reductoras involucradas en la degradación de lignina, es una proteína hemoglicosilada producida por casi todos los hongos que colonizan madera [48]. La lacasa utiliza el oxígeno como aceptor de electrones para liberar el hidrógeno de los grupos hidroxilos de las sustancias

fenólicas; sin embargo, la lacasa no puede oxidar las sustancias no fenólicas por si misma.

La lignina está formada por compuestos fenólicos (10–20%) y no fenólicos (80–90%). El rompimiento de los enlaces no fenólicos es necesario para que se degrade la lignina, en este paso participa la LiP oxidando los enlaces no fenólicos de lignina, aunque la LiP no puede ser detectada en muchos hongos ligninolíticos [49, 50].

La biodegradación de lignocelulosa es un proceso bioquímico complejo y todavía no está completamente estudiado. En los materiales lignocelulósicos, la lignina protege a la celulosa y a las hemicelulosas contra la degradación enzimática de hongos o bacterias. Para la biotransformación de estos materiales interviene la interacción de la celulasa, *D*-glucosa oxidasa y peroxidasas fúngicas [2, 24, 46]. El modelo más común de ataque en hemicelulosas y celulosa, es con una degradación simultánea de los polisacáridos y lignina, no obstante, en otros casos se ha observado una degradación selectiva de lignina [53].

2.5.3 Deterioro de la madera plástica

Los materiales compuestos reforzados con fibras naturales, conocidos también como madera plástica (WPC, del inglés “Wood Plastic Composites”) contienen dos constituyentes poliméricos. El primer componente, que forma la fase continua, es la matriz polimérica en la cual se encuentran embebidas las fibras naturales. Las matrices son comúnmente polímeros sintéticos económicos que son capaces de fluir al agregarles calor, esto le permite una flexibilidad considerable al material cuando se combina con las fibras. El

segundo componente son las fibras naturales; las cuales son más baratas, rígidas y pueden incluso llegar a ser más resistentes que los polímeros sintéticos, debido a lo cual comúnmente son usadas como relleno o refuerzo [12].

Al principio los WPC eran considerados muy resistentes a la degradación microbiológica debido a que las fibras naturales supuestamente se encuentran inmersas casi en su totalidad en la matriz polimérica; ahora se sabe que esto no es verdad [13]. Comúnmente los WPC son materiales porosos, y su grado de porosidad es determinado por las condiciones de procesamiento y la humedad contenida en la materia prima (principalmente en las fibras naturales). Los poros en los materiales compuestos normalmente son abiertos y forman cadenas de poros penetrando la matriz entera. La fibra natural se encuentra expuesta a estos poros, por lo tanto hay un mayor o menor grado de absorción de agua. Como resultado se da una contaminación microbiana en el interior del material, y por lo tanto la degradación biológica de las partículas de la fibra natural (y en algunos casos de otro tipo de partículas y aditivos que sean fuente de alimento para microorganismos) [12, 13].

Existen tres niveles de efectos microbianos sobre los WPC. Primero, cuando el hongo (también llamado moho) forma puntos de colores en la superficie del material (aunque eso no lo degrada) el cual permanece estructuralmente entero. En este caso el moho se alimenta a sí mismo con polvo o partículas del aire como el polen. Segundo, cuando el moho y otros hongos consumen de manera poco significativa algunos ingredientes del material compuesto y los usan como nutrientes, vitaminas, etc. Tercero, cuando los hongos atacan, específica y rápidamente la fibra de madera/celulosa en los materiales

compuestos, lo cual causa una disminución en las propiedades mecánicas del material ^[13].

Muchos hongos son considerados como “moho” en lugar de hongos degradadores de las fibras naturales, debido a que principalmente solo causan decoloración en la misma. El moho generalmente no causa una reducción de la celulosa o en la resistencia del material compuesto. Sin embargo ya que los mohos y los hongos de pudrición crecen en las mismas condiciones, la presencia de los mohos puede ser tomado como una señal de un deterioro potencial del material compuesto. Por otro lado, muchos mohos causan alergias y por ende, son peligrosos para la salud.

La celulosa tiene un contenido de humedad del 19% o menor, generalmente esto hace que no propicie el crecimiento de hongos ^[54-56]. Las esporas del hongo entran en un tipo de hibernación, capaces de mantenerlo, algunas veces durante décadas. Son prácticamente invisibles pero aún así pueden causar alergias en algunas personas, estornudo o tos. En el caso de los tableros a base de un material compuesto con fibras de celulosa raramente pueden llegar a poseer una humedad mayor del 19%, excepto cuando estos materiales son expuestos a la lluvia ya que se forma una capa delgada de agua en la superficie. Sin embargo esta capa suele secarse rápido y en consecuencia las esporas inician un estado de hibernación nuevamente.

También puede ocurrir que dichos tableros de WPC se encuentren expuestos a una ventilación inadecuada, lo que ocasiona que el contenido de humedad pueda superar el 20– 25% y permanezca retenida por mucho tiempo. Con la ausencia de biocidas, antimohos u otros agentes antimicrobianos en la

formulación de los materiales compuestos, el hongo puede ser excesivo y actuar agresivamente.

La probabilidad de que ocurran estos casos de degradación microbiana está determinada por la accesibilidad de la microflora a la matriz, esto a su vez está determinado por el grado de la porosidad de la densidad de compuestos, del tipo de material, de la absorción de agua, del contenido de minerales en el material (a menudo los minerales desempeñan un papel de escudo, bloqueando la invasión de microbios en la matriz), y de la presencia de biocidas o agentes antimicrobianos [57, 58].

2.6 Envejecimiento de los materiales compuestos

Existen dos formas de estudiar la fotodegradación de los materiales, una de ellas consiste en someter al material a las condiciones naturales de degradación (envejecimiento natural). La otra se basa en acelerar el envejecimiento del material, simulando las condiciones del medio ambiente, como son la humedad y radiación solar en dispositivos diseñados para tal fin (cámaras de envejecimiento acelerado).

2.6.1 Envejecimiento acelerado

Los análisis de envejecimiento acelerado se usan como medio para comparar formulaciones o bien como un control de calidad, más que para estimar el tiempo de vida útil de un material, puesto que los equipos para ello no reproducen con exactitud las condiciones ambientales. Tres situaciones determinan la base para la realización de este tipo de pruebas en el laboratorio:

- ✓ Para simular los efectos de la luz solar se utiliza luz UV con una determinada λ (longitud de onda).

-
- ✓ Es recomendable simular los efectos de la humedad ambiental, mediante condensación a temperaturas elevadas.
 - ✓ Es posible acelerar los efectos de la luz UV y de la condensación por elevación de la temperatura en la prueba ^[59].

2.7 Caracterización del material compuesto

El conocimiento de las propiedades superficiales, físicas y químicas de los materiales es un requisito previo indispensable para su correcta aplicación, por ello existe una variedad de técnicas y métodos para el estudio de dichas propiedades que proporcionan información para poder entender el comportamiento de los materiales ^[12, 26].

2.7.1 Espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR)

Esta técnica es utilizada para obtener información sobre la estructura molecular y enlaces químicos de los componentes del material compuesto. En algunos casos se utiliza para obtener información sobre la orientación de las moléculas relativas hacia el sustrato reflectivo ^[60].

La Espectroscopía Infrarroja (IR) se basa en la vibración de los enlaces químicos a frecuencias específicas. Las moléculas tienen enlaces los cuales poseen frecuencias características que corresponden a un enlace en particular. Para conocer este tipo de enlaces en la superficie se hace pasar un rayo de luz infrarroja a través de la muestra y la energía absorbida para cada frecuencia es registrada en esta técnica. La longitud de onda IR que se utiliza frecuentemente para el análisis superficial se encuentra en el rango de 2500 nm a 16 000 nm ^[12].

En general, la información que se puede obtener de los espectros de infrarrojo puede ser cualitativa o cuantitativa:

- Naturaleza química: unidad estructural, tipo y grado de ramificación, grupos terminales, aditivos e impurezas.
- Ordenamiento estérico: isomerismo cis-trans, estereorregularidad.
- Ordenamiento conformacional: arreglo físico de la cadena polimérica.
- Estado de orden: fases cristalinas, mesoformas y amorfas.
- Orientación: tipo y grado de la cadena polimérica preferencial, alineación de los grupos laterales en materiales anisotrópicos.

2.7.2 Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)

Esta técnica es una herramienta de análisis superficial muy utilizada en ciencia de los materiales. Se basa en el principio que señala que cuando un haz de electrones es dirigido a la muestra de análisis se da una emisión de electrones (y otras emisiones electromagnéticas) que son detectados para producir una imagen de la superficie de la muestra. Los electrones secundarios y desviados por la muestra son detectados, y se genera la imagen. La técnica MEB es ampliamente usada para observar superficies de fractura en materiales compuestos y proporciona información sobre la interacción y adhesión fibra-matriz, así como el tipo de falla en la interfase ^[12].

2.7.3 Tipos de ensayos mecánicos

Las características y propiedades de los materiales compuestos se han podido determinar a través de pruebas mecánicas. Las propiedades mecánicas de los materiales son consideradas entre las más importantes, debido a que en todas

las condiciones de servicio y en la mayoría de sus aplicaciones involucran algún grado de esfuerzo mecánico [8, 61].

Existe un gran número de pruebas mecánicas y de instrumentos de ensayo. Hay métodos muy especializados pero no han sido oficialmente estandarizados; los que han cumplido con este último requisito son descritos en diferentes publicaciones, como por ejemplo la de la “American Society for Testing of Materials” (ASTM) cuyos estándares son de los más utilizados para la caracterización de materiales plásticos. El objetivo de la estandarización es el de realizar ensayos simples y uniformes. En ocasiones puede no existir una buena correlación entre las pruebas y el uso práctico del material. Las pruebas más representativas para determinar las propiedades mecánicas en plásticos son la resistencia a la tensión, al impacto y a la flexión.

Resistencia a la tensión

La resistencia al esfuerzo de tensión en un material se define como el esfuerzo requerido para romperlo mediante un ensayo de tensión. Su magnitud se expresa en fuerza por unidad de área de sección transversal, generalmente N/m^2 . La resistencia a la tensión puede ser medida en megapascales (MPa) o gigapascales (GPa). El valor de esta propiedad en los materiales depende principalmente de la estructura química, es decir de la naturaleza de los átomos y su arreglo, y de su peso molecular; también pueden influir su procesamiento e historia térmica.

La medición de la resistencia al esfuerzo de un cuerpo se relaciona con los efectos de las fuerzas internas que actúan dentro de él. Las propiedades de tensión se miden a velocidades bajas, ya que a altas velocidades de

deformación la resistencia a la tensión y el módulo de elasticidad aumenta notablemente, mientras que su elongación se ve disminuida.

En términos generales, para medir la resistencia a la tensión de una muestra polimérica, se toma la muestra y se estira con una máquina de pruebas universales. Esta máquina simplemente sujeta cada extremo de la muestra y luego procede a estirla (Fig. 2.7). Mientras dura el estiramiento de la muestra, se va midiendo la fuerza que va ejerciendo. Cuando se conoce la fuerza que se está ejerciendo sobre la muestra, se divide ese número entre el valor del área de la sección transversal de la muestra y el resultado es el esfuerzo que está experimentando. La fuerza se va incrementando, al igual que la tensión, hasta llegar a un punto en el cual la muestra se rompe.

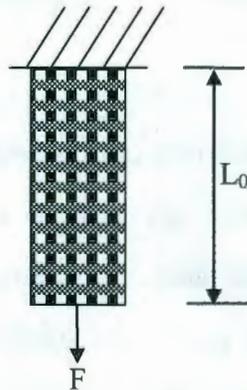


Figura 2.7. Esquema simple de un ensayo a tensión (F : carga aplicada, L_0 : longitud inicial).

La resistencia a la tensión puede determinarse, por ejemplo, mediante una prueba en la que se somete a tensión una barra de un material; el gráfico que proporciona más información sobre el comportamiento del material es la curva esfuerzo – deformación (Fig. 2.8). Esta curva se puede obtener midiendo continuamente la fuerza aplicada para deformar el material a una

velocidad de extensión constante. Durante el ensayo, el equipo mide con exactitud los cambios de longitud y la carga, que se convierten en deformación y esfuerzo. Con estos datos se traza una gráfica que muestra la variación del esfuerzo unitario (σ) en las ordenadas, contra los valores correspondientes de las deformaciones unitarias (ϵ), en las abscisas.

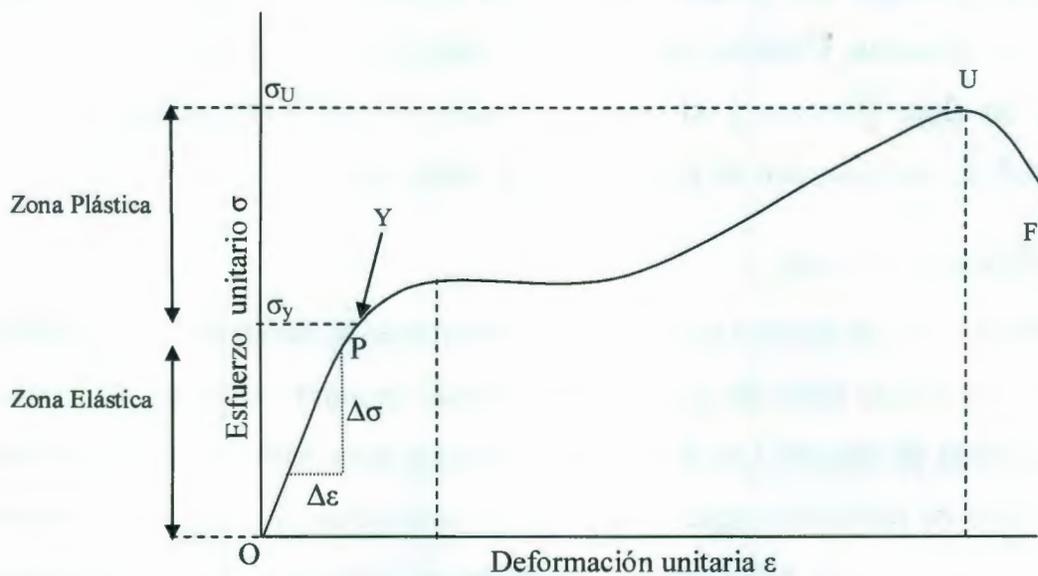


Figura 2.8. Curva típica esfuerzo vs deformación.

La curva empieza en el origen y continúa como una línea recta hasta que llega a un punto denominado P (límite de proporcionalidad); la pendiente de esta sección recta determina el módulo de Young o módulo de elasticidad del material. Más adelante se encuentra el punto Y (punto de cedencia) donde la curva disminuye su pendiente, volviéndose más horizontal, la curva tiende otra vez a subir hasta U, alcanzando así el punto F, donde ocurre la falla. En el punto Y, el material fluye o se deforma plásticamente. El esfuerzo con el cual comienza esta fluencia se llama “esfuerzo en el punto de cedencia”, representado como σ_Y . El esfuerzo correspondiente al punto U, se llama

“esfuerzo último del material”, σ_U , y representa la resistencia o el máximo esfuerzo que el material es capaz de soportar.

La zona elástica de un material es el intervalo de esfuerzos dentro del cual el material permanece elástico, es decir, regresa a su forma original después de eliminar la carga. En la zona elástica, los esfuerzos son menores a los del punto de fluencia. Cuando los esfuerzos superan el punto de fluencia, tiene lugar un flujo plástico y el material nunca vuelve a recuperar su forma original. A este intervalo de esfuerzos se le llama zona plástica.

Resistencia a la flexión

El objetivo de una prueba de flexión es determinar la resistencia y el módulo de flexión de una barra de una material cuando es sujeto a cargas de flexión. Las pruebas de flexión son ampliamente usadas para estimar las propiedades mecánicas de polímeros rígidos, debido a la simplicidad de la prueba. En este tipo de ensayos, una barra plana rectangular es soportada simplemente cerca de cada extremo y sujeta a flexión en tres puntos con aplicación continua de carga en el punto medio (Fig. 2.9), o para flexión a cuatro puntos usando dos puntos de carga colocados cerca y simétricamente, de uno y otro lado del punto medio. Tanto los puntos de apoyo como los puntos de carga pueden ser circulares para minimizar la indentación. A partir de las curvas de esfuerzo-deformación, se pueden calcular la resistencia a la flexión o el esfuerzo de cedencia a flexión dependiendo del modo de falla y también se puede determinar el módulo de flexión de la sección recta de dicha curva.

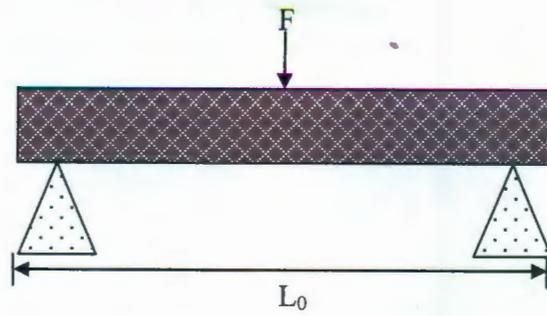


Figura 2.9. Prueba de flexión en tres puntos (F : carga aplicada, L_0 : longitud inicial).

CAPÍTULO III
MATERIALES Y
MÉTODOS
EXPERIMENTALES

3.1 Materiales y reactivos

Para este trabajo se utilizaron los siguientes materiales para la elaboración del material compuesto:

- ✓ Fibra de bonote de coco (FBC). Variedad Alto Pacífico 2 (ecotipo MXPT2)^[62] proveniente de la empresa Coirtech con dirección en Ocampo, # 314, col. Centro, CP. 28100, Tecomán, Colima (Fig. 3.1).



Figura 3.1. Fibra de bonote de coco.

- ✓ Polietileno de alta densidad reciclado (HDPE-R), con un índice de fluidez (MFI) de 4.56 g/10 min y proveniente de la empresa recuperadora de plásticos Hernández ubicada en la col. San Pedro Uxmal de Mérida, Yucatán (Fig. 3.2).



Figura 3.2. Polietileno de alta densidad reciclado.

- ✓ Polybond 3009 (AA). Utilizado como agente acoplante. Adquirido de la empresa Brenntag, S.A. de C.V. Este material es polietileno de alta

densidad injertado con anhídrido maleico. Se encuentra en forma de “pellets”. Posee un MFI y una densidad (a 23°C) de 5 g/10 min y 0.95 g/cm³; respectivamente. El nivel de anhídrido maleico es de 1 % en peso, mientras que su temperatura de fusión es de 127 °C.

- ✓ Struktol TPW113 (AP). Utilizado como ayuda de proceso. Adquirido de Struktol Company of America. Es una mezcla de complejos de ésteres de ácidos grasos modificados. Se encuentra en forma de esferas o pastillas. Posee un punto de inflamación en el intervalo de 67 – 77 °C y una gravedad específica de 1.005.

Para el tratamiento biológico se utilizó la cepa de hongo de pudrición blanca *Phanerochaete chrysosporium* (Fig. 3.3) cultivado y proporcionado por el grupo de la Dra. Blondy Canto de la Unidad de Biotecnología del Centro de Investigación Científica de Yucatán (UBT-CICY).



Figura 3.3. Cepa del microorganismo *Phanerochaete chrysosporium*.

Para la inoculación del material compuesto se utilizaron los reactivos señalados en la norma ASTM G21–96 ^[63]. Para la desinfección se utilizó una solución de cloro al 10% p/p y etanol. Todos los reactivos para el cultivo del hongo y la inoculación fueron proporcionados por la Dra. Blondy Canto.

3.2 Parte experimental

El procedimiento general consistió en cuatro etapas que se describen a continuación:

3.2.1 Etapa I: Elaboración del material compuesto

Reducción de tamaño de partícula: El HDPE-R, el AA y el AP se molieron en un molino BRABENDER, TI 880804 de cuchillas rotacionales utilizando una malla de 1 mm (Fig. 3.4a). La FBC fue secada a 80°C, por 24 horas, en un horno de convección forzada y posteriormente fue molida en un molino de cuchillas marca Pagani 1520 con una criba de 1 mm de diámetro (Fig. 3.4b). Posteriormente, la FBC molida fue tamizada en un equipo Rotap (W.S. TYLER, INCORPORATED), modelo RX-29 (Fig. 3.4c) utilizando tamices mallas 20, 30, 40 y 50. Para la elaboración del material compuesto se utilizó la FBC retenida en la malla 40, lo cual proporcionó FBC con un tamaño de partícula aproximada entre 0.420 y 0.297 mm.



Figura 3.4. a) Molino BRABENDER, TI 880804; b) Molino Pagani 1520; c) Tamizador Rotap modelo RX-29.

Después de la reducción de tamaño de partícula de todos los componentes, se realizó la preparación de la mezcla de acuerdo con la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Composición de la mezcla.

Componentes	% peso	Cantidad en gramos
FBC	40	800
HDPE-R	60	1200
AA	5 (con respecto a FBC)	40
AP	3 (con respecto a FBC)	24

Preparación de la mezcla: Se empleó una mezcladora de cinta marca Intertécnica con una capacidad de 5 L (Fig. 3.5). Primero se alimentó el equipo, al mismo tiempo, con la FBC y el AA y se dejó mezclar por 15 minutos. Posteriormente, se agregó el AP y por último HDPE-R. Tanto para el AP como para el HDPE-R el tiempo de mezclado fue de 15 minutos. La mezcla obtenida se introdujo en un horno de convección forzada a 80°C donde permaneció por un período de 24 horas.



Figura 3.5. Mezcladora de cinta marca Intertécnica con capacidad de 5 L.

Formulación del material compuesto: La mezcla obtenida fue procesada en un extrusor cónico doble-husillo de laboratorio marca BRABENDER (Fig. 3.6a) con 3 zonas de calentamiento y un dado de extrusión de 5 mm de diámetro

interno, acoplado a la salida para obtener extruidos en forma de varilla. La temperatura de procesamiento para las 3 zonas de calentamiento (alimentación, fundido y compresión) y la zona del dado fue de 140°C. Los materiales extruidos obtenidos fueron “pelletizados” en un equipo CW-BRABENDER modelo 12-72-000 (Fig. 3.6b).



Figura 3.6. a) Extrusor de laboratorio marca BRABENDER; b) Equipo CW-BRABENDER 12-72-000.

Elaboración de probetas: Se empleó el proceso de moldeo por compresión. Para elaborar las probetas de tensión se utilizó un molde (Fig. 3.7a) con las dimensiones específicas para probetas tipo V (norma ASTM D638) ^[64] y una prensa manual CARVER con caja de aislamiento (Fig. 3.7b). Se colocaron 3 g de pellets obtenidos para cada probeta. Antes de comprimir, los pellets se mantuvieron en los moldes por 5 minutos a 145 °C. Posteriormente se aplicó una presión de 44 482 N (10 000 psi) a la misma temperatura, lo cual se mantuvo por 15 minutos. Por último se dejó enfriar a la misma presión hasta alcanzar la temperatura ambiente.

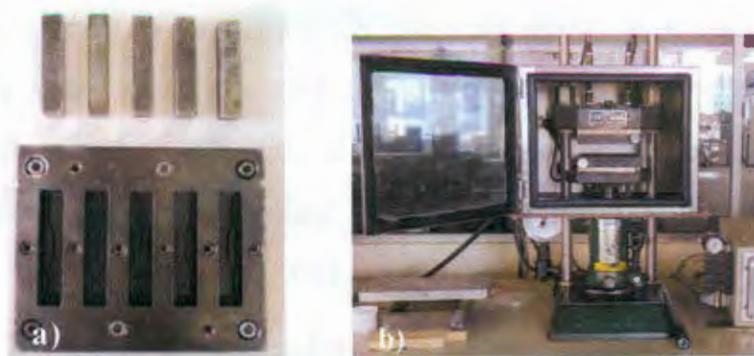


Figura 3.7. a) Molde para elaborar probetas de tensión; b) Prensa CARVER manual.

Para obtener las probetas de flexión se utilizaron placas elaboradas en un molde cuadrado (Fig. 3.8a). Las dimensiones de la probeta fueron las señaladas por la norma ASTM D790 ^[65]. Se colocó en el molde la cantidad de 90 g de pellets del material compuesto. Para comprimir el material se empleó una prensa automática CARVER modelo 3891 (Fig. 3.8b), antes de aplicar la presión se precalentó a 145°C por 5 minutos. Luego se aplicó una presión de 26 689 N (6 000 lbf) a una temperatura de 145°C en ambos platos por 15 minutos. Se dejó enfriar gradualmente a presión constante hasta llegar a temperatura ambiente. Posteriormente la placa obtenida fue cortada en una sierra cinta marca Truper. Cada probeta obtenida fue rectificada en una pulidora circular marca Struers LaboPol5 (utilizando lijas No. 100 y 320) hasta obtener las dimensiones especificadas por la norma.

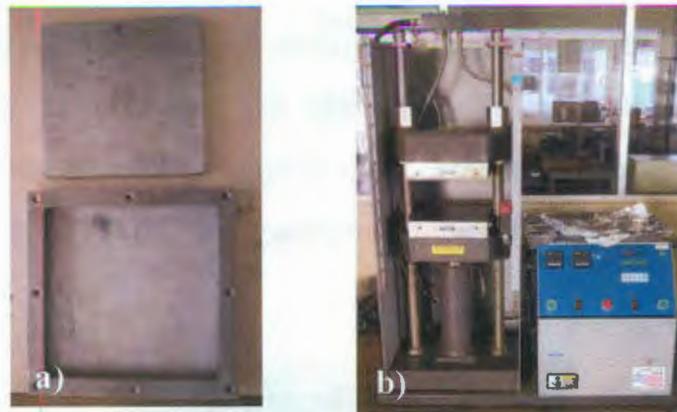


Figura 3.8. a) Molde para elaborar placas (probetas flexión); b) Prensa CARVER automática (3891).

Se elaboraron dos grupos de probetas de acuerdo con la Tabla 3.2. Las probetas que corresponden al grupo “control” no fueron expuestas al microorganismo.

Tabla 3.2. Número de probetas elaboradas para cada grupo.

	Ensayo	Control	T1*	T2**
Grupo I (SI): Exposición directa a <i>Phanerochaete chrysosporium</i>	Tensión	10	10	10
	Flexión	10	10	10
Grupo II (CI): Exposición previa a envejecimiento acelerado y luego a <i>P. chrysosporium</i>	Tensión	10	10	10
	Flexión	10	10	10

*Probetas para incubación durante 28 días con *P. chrysosporium* (T1). Período establecido por la norma ASTM G21-96.

**Probetas para incubación durante 56 días con *P. chrysosporium* (T2).

3.2.2 Etapa II: Exposición de probetas a envejecimiento acelerado

Las probetas del grupo II fueron expuestas en una cámara de envejecimiento acelerado ATLAS/UVCON (Fig. 3.9) ubicada en instalaciones del Centro de Investigaciones en Corrosión de la Universidad Autónoma de Campeche (CICORR-UAC). El período de exposición fue de 1000 horas utilizando

ciclos de 4 horas de condensación y 4 horas de radiación UV con lámparas de radiación UVA-340. Para la realización del fenómeno de condensación se suministró de manera constante, agua destilada. El protocolo seguido para esta prueba es el reportado en las normas ASTM G154-00 ^[66] y ASTM D4329-99 ^[67].



Figura 3.9. Cámara de envejecimiento acelerado ATLAS/UVCON.

3.2.3 Etapa III: Inoculación e incubación del material compuesto

Las probetas del grupo I fueron expuestas al hongo *P. chrysosporium* y las del grupo II fueron sometidas a un tratamiento de envejecimiento acelerado seguido de la exposición al hongo, el procedimiento utilizado se describe a continuación:

Inoculación del microorganismo: Previo a su inoculación, el material fue esterilizado a 120 °C y 15 psi por 15 minutos en una autoclave automática Felissa modelo FE-399. Sobre la superficie de las probetas se realizó la inoculación de *P. chrysosporium* siguiendo lo establecido en la norma ASTM G21-96. La cantidad de esporas inoculadas sobre el material fue ajustada

según el área de exposición de cada tipo de probeta de acuerdo con lo siguiente:

De acuerdo con la norma ASTM G21-96, el área de inoculación es de 2500 mm² (50 x 50 mm). Según la norma, a esta área le corresponden 1000 000 ± 200 000 esporas/ ml. El área superficial de una probeta de flexión (de acuerdo con ASTM D790) es de 1 612 mm² (12.7 x 127 mm), ver Fig. 3.10. De acuerdo con esto, se tiene que la cantidad de esporas a inocular (*x*) en cada probeta de flexión puede calcularse mediante una simple regla de tres:

$$\begin{array}{l} 2500 \text{ mm}^2 \text{ ---} \\ 1612 \text{ mm}^2 \text{ ---} \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{---} 1000 \text{ 000 esporas /ml} \\ \text{---} x \end{array}$$

Así, se requieren 645 160 esporas /ml para una probeta de flexión. Se elaboraron 40 probetas de flexión por lo que la cantidad mínima de esporas requeridas fue de 645 160 x 40 = 25 806 400 esporas /ml.



Figura 3.10. Probeta para ensayos a flexión según ASTM D790.

En el caso de las probetas de tensión (según ASTM D638), el área de éstas es de 37.8 mm² (12 x 3.15 mm), ver Fig. 3.11. Entonces:

$$2500 \text{ mm}^2 \text{ ----- } 1000 \text{ 000 esporas /ml}$$

$$37.8 \text{ mm}^2 \text{ ----- } x$$

De esta manera, se requieren 15 120 esporas /ml para una probeta de tensión. Se prepararon 40 probetas de tensión, por lo que la cantidad mínima de esporas requerida fue de $15\ 120 \times 40 = 604\ 800$ esporas /ml.

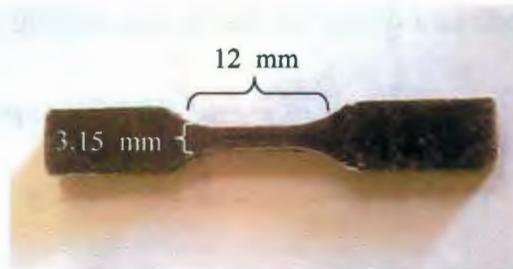


Figura 3.11. Probeta para ensayos a tensión según ASTM D638.

Incubación de probetas: El período de incubación fue de 28 días, y la temperatura del cuarto de incubación fue de 30 – 32°C. La Figura 3.12 muestra probetas típicas de tensión y flexión inoculadas en cajas de Petri.

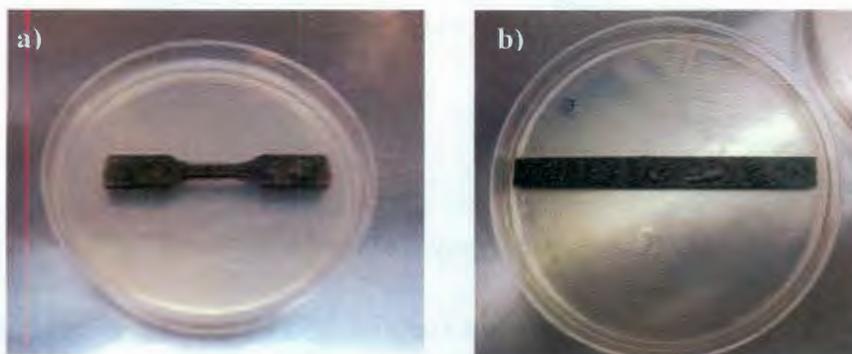


Figura 3.12. Material inoculado. a): Probeta de tensión; b): Probeta de flexión.

Desinfección de probetas: Después del tiempo de incubación, de acuerdo a la norma correspondiente, todas las probetas fueron retiradas de las cajas de Petri. Se desinfectó todo el material utilizando una solución de cloro al 10% v/v y etanol.

Cálculo de porcentaje de pérdida de peso: La pérdida de peso es un parámetro muy importante en la degradación biológica de un material, por lo que es muy utilizado en este tipo de estudios. La pérdida de peso se reporta como porcentaje de pérdida de peso del componente maderable en el compuesto (40% de fibra de bonote de coco), porque se asume que el componente polimérico no se pudre.

Antes de **inocular**, se realizó un acondicionamiento inicial de las probetas que consistió en secarlas a 60°C en un horno de convección forzada hasta alcanzar un peso constante, el cual quedó registrado como peso inicial (P_0). Después de que todas las probetas se desinfectaron, éstas fueron secadas de la misma forma que en el acondicionamiento inicial a 60°C hasta alcanzar el peso constante, este último dato se registró como peso final (P_f). La pérdida de peso (%PP) fue calculada de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\%PP = \frac{(P_0 - P_f)}{P_0} \times 100$$

3.2.4 Etapa IV. Caracterización del material compuesto

Análisis químico: Las superficies expuestas a *P. chrysosporium* de las probetas a tensión fueron analizadas mediante espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR), empleando un equipo FTIR Nicolet Protège 460 acoplado a una computadora. Se utilizó una celda fotoacústica para

obtener los espectros del material compuesto. Las superficies no expuestas a *P. chrysosporium* también fueron analizadas con la finalidad de que sirvieran como referencia. El eje Y de todas los espectros obtenidos están representados en escala fotoacústica. Todos los espectros obtenidos fueron normalizados.

Caracterización mecánica: Las propiedades mecánicas a tensión y flexión de los materiales compuestos preparado se midieron utilizando una máquina de pruebas universales INSTRON modelo 1125 (Fig. 3.13), de acuerdo con la normas ASTM D638-02 y ASTM D790 respectivamente. Antes de las pruebas, las probetas se acondicionaron a una temperatura de 23°C y humedad relativa de 45% por 24 horas.



Figura 3.13. Máquina de pruebas universales INSTRON modelo 1125.

Análisis morfológico: Se realizó el análisis morfológico de la superficie de exposición del material a envejecimiento acelerado y a *P. chrysosporium* (probetas de tensión) utilizando Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) en un equipo JEOL 6360 LV operado a 20 kV.

CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier

El espectro IR del material compuesto elaborado con HDPE-R, FBC, AA y AP, sin ser expuesto al ataque biológico de *Phanerochaete chrysosporium* ni a envejecimiento acelerado (TOSI) se presenta en la Fig. 4.1. Se pueden observar las principales bandas de absorción características del polietileno en 2919 y 2850 cm^{-1} [68-70], las cuales sugieren la presencia de grupos CH_2 . La Fig. 4.1 también muestra la presencia de bandas de absorción de menor intensidad que ocurren en 1465, 1368 y 722 cm^{-1} , que también son características del polietileno y que son atribuidas a la existencia de grupos CH_2 en el material compuesto [66, 69, 71].

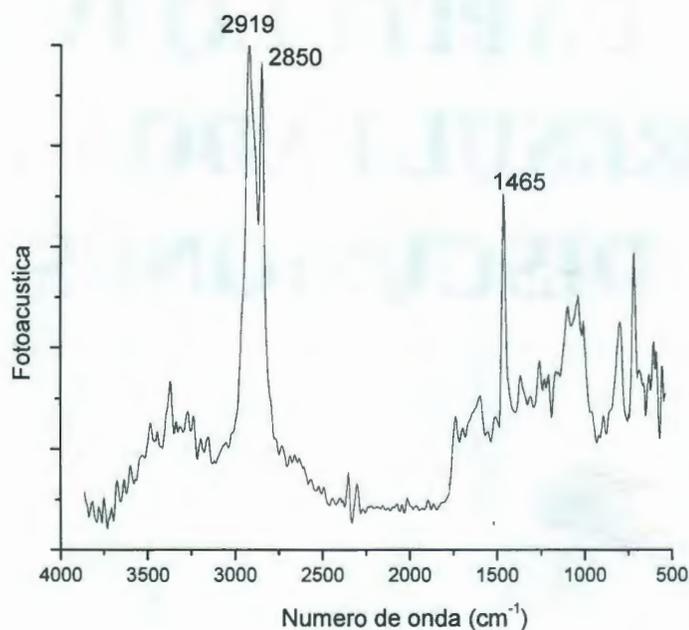


Figura 4.1. Espectro IR para el material compuesto de referencia (TOSI).

Por otro lado, de manera similar a lo observado en diferentes trabajos relacionados con materiales lignocelulósicos, en la Fig. 4.2 se aprecian las bandas representativas de la fibra natural correspondientes a la lignina: 1740

(C=O también en hemicelulosas); 1596 y 1511 (C=C en anillos aromáticos): 1267 (C-O aromáticos) y 1244 cm^{-1} (C-O aromáticos y alifáticos) [29, 68, 72-74]. De igual forma se pueden observar las bandas características de la celulosa: 1312 (CH_2); 1204 (OH); 1039 (C-O); 1151 y 1166 (C-O-C); 1371 (C-H) y 898 cm^{-1} (C-H en anillo aromático) [29, 71-73].

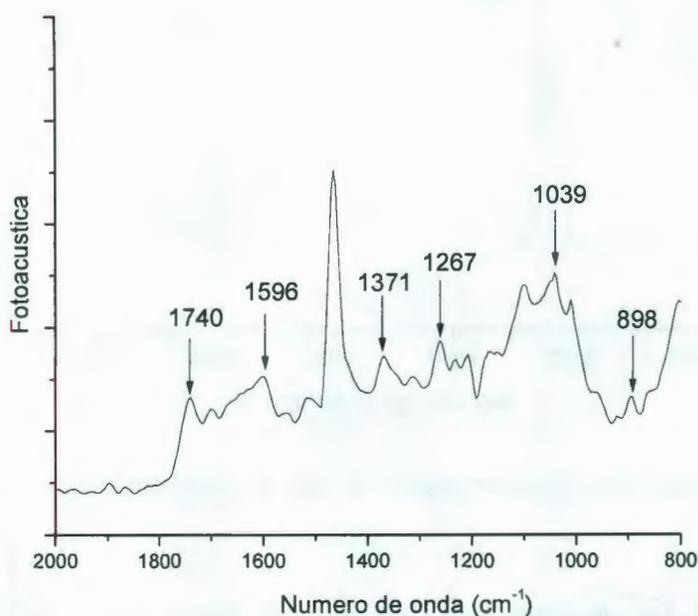


Figura 4.2. Amplificación del espectro IR de la Fig. 4.1 (región 1800 – 800 cm^{-1}) para el material compuesto de referencia (T0SI).

En la Fig. 4.3 se observa el espectro IR del material que fue expuesto directamente a *P. chrysosporium* (grupo I). Se observa una disminución en las bandas correspondientes a la lignina como 1267 y 1244 cm^{-1} , esto indica que *P. chrysosporium* tiene una preferencia por degradar la fracción de lignina que contiene el material [75 – 77].

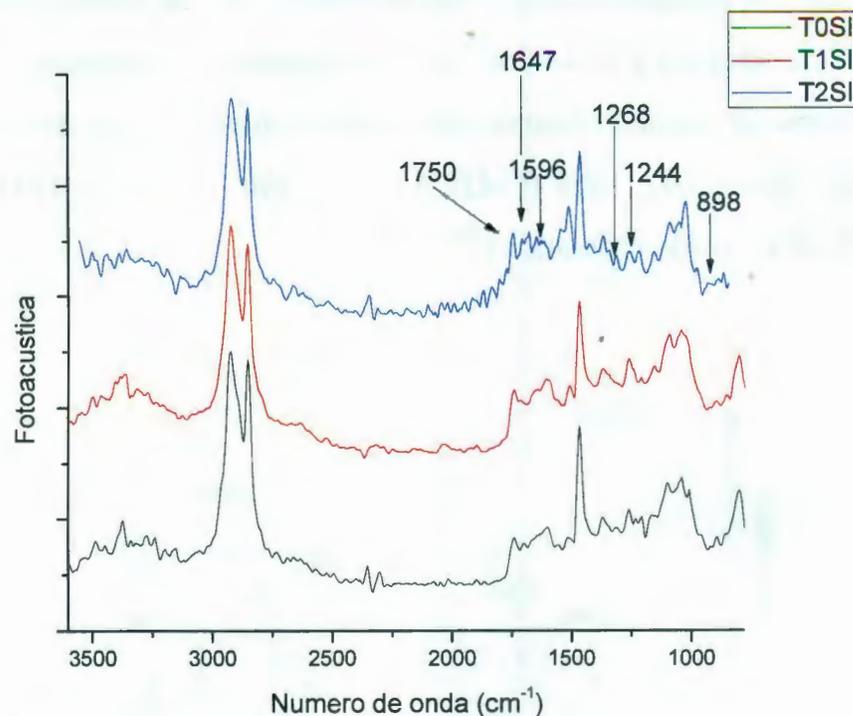


Figura 4.3. Comparación entre los espectros IR para materiales compuestos del grupo I (SI).

En la Fig. 4.3 se observa también que la banda de 1647 cm^{-1} tiende a incrementarse con el tiempo de exposición al hongo. A pesar de que el HDPE es considerado como un material con baja probabilidad de ser afectado por los hongos, algunos autores han propuesto que esto puede deberse a que la descomposición por hongos de pudrición blanca o café, puede inducir a la formación de enlaces $\text{C}=\text{C}$ debido a la presencia de enzimas peroxidasas en su intento por oxidar el HDPE, sin embargo, también podría deberse a los cambios que producen los hongos en la estructura química de la lignina ^[75]. En la Fig. 4.3 se observa también un incremento y la aparición de bandas (particularmente para T1SI) que denotan la presencia de grupos hidroxilos ($3358 - 3333\text{ cm}^{-1}$), que en parte podría deberse a que la biodegradación de la

lignina se basa en la producción de especies oxidativas, tales como la formación de radicales hidroxilos durante el crecimiento de los hongos de pudrición blanca en el material, los cuales inician el proceso biodegradativo del mismo [78].

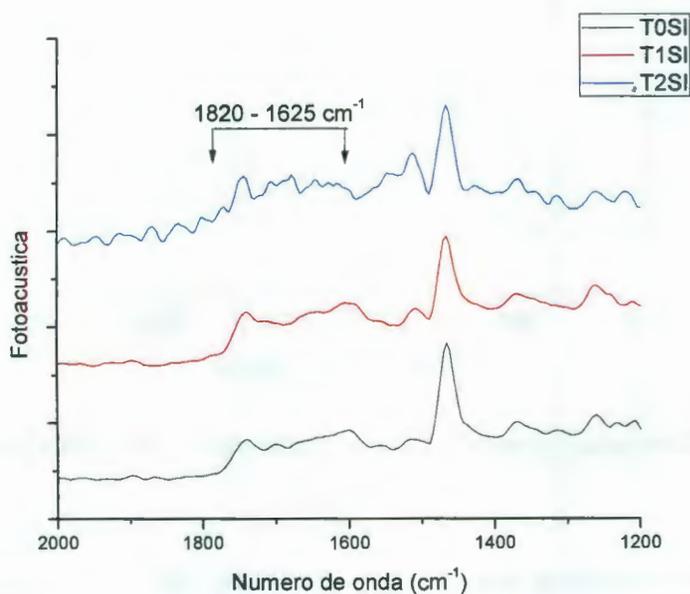


Figura 4.4. Amplificación del espectro IR de la Fig. 4.3 (región 2000 – 1200 cm⁻¹) para el material compuesto del grupo I (SI).

En la Fig. 4.4 se observa la aparición de nuevas bandas comprendidas en el intervalo 1820 – 1625 cm⁻¹ para T2SI, dicho intervalo corresponde a la región de los grupos carbonilos. Esto ha sido señalado en estudios similares como un indicador del ataque biológico de los hongos de pudrición blanca sobre los materiales lignocelulósicos [75, 77 79].

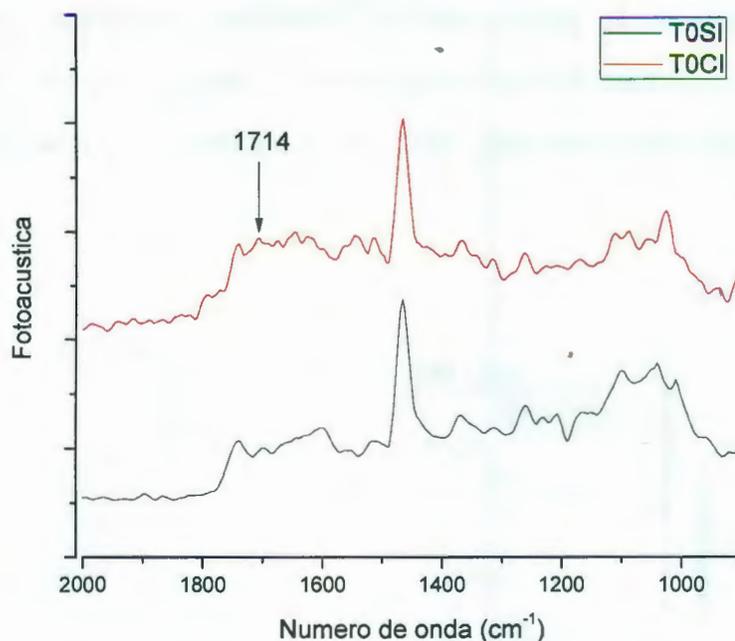


Figura 4.5. Comparación entre los espectros IR para T0SI y T0CI (materiales de referencia).

Al comparar las muestras con y sin exposición al envejecimiento acelerado (Fig.4.5) se observó la aparición de nuevas bandas alrededor de 1714 cm^{-1} ($1800 - 1680\text{ cm}^{-1}$) para el material expuesto al envejecimiento acelerado (T0CI), esta corresponde a la vibración del grupo carbonilo ($\text{C}=\text{O}$). Para esta región se ha reportado en la literatura que para los WPCs con matriz de HDPE existen cuatro diferentes tipos de grupos carbonilos: cetonas conjugadas ($1700 - 1685\text{ cm}^{-1}$), ácidos carboxílicos ($1725 - 1715\text{ cm}^{-1}$), ésteres ($1745 - 1730\text{ cm}^{-1}$) y γ - lactonas ($1800 - 1765\text{ cm}^{-1}$), estas nuevas bandas indican la formación de productos debido a la exposición del material a la fotodegradación [69, 80, 81].

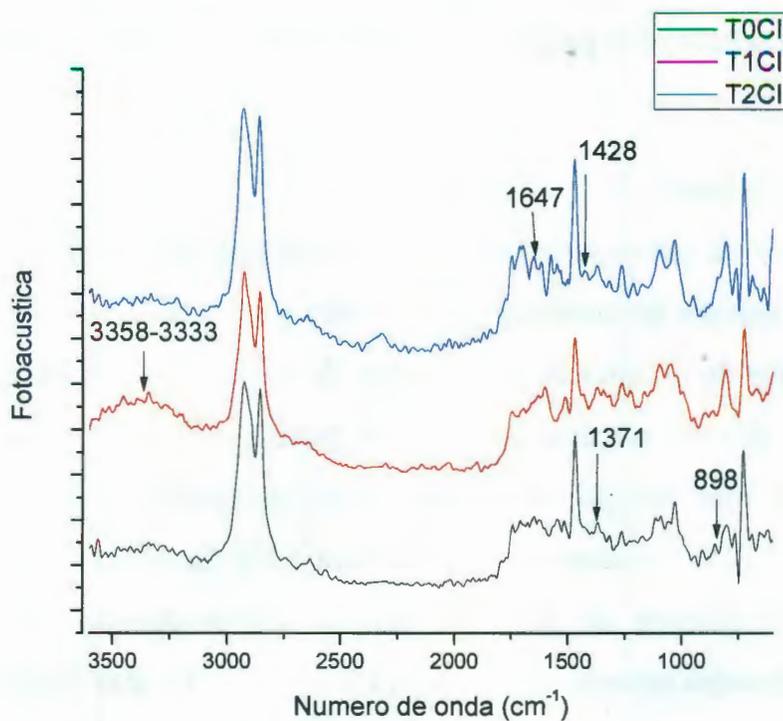


Figura 4.6. Comparación entre los espectros IR para materiales compuestos del grupo II (CI).

El espectro IR correspondiente al grupo II se muestran en la Fig. 4.6. Después de exponer el material a envejecimiento acelerado y a *P. chrysosporium* se observó una disminución moderada en las bandas 1505 y 1428 cm^{-1} (lignina), algo similar a lo observado en el grupo I. También se observó que bandas como 1371 y 898 cm^{-1} tienden a desaparecer, todas están relacionadas con polisacáridos (hemicelulosas y celulosa). Lo anterior también se ha observado en otros estudios similares en los cuales los polisacáridos del material parecen ser afectados por los hongos de pudrición blanca; los autores de dichos estudios sugieren que, aunque algunos hongos suelen ser selectivos en el consumo de la lignina presente en el material, la afectación a la fracción de

celulosa y hemicelulosas podría ser tomado como un indicio de deterioro en el material [75, 76].

4.2 Pérdida de peso

Los resultados de los experimentos para determinar la pérdida de peso en las probetas de tensión se presentan en la Tabla 4.1. Para las muestras del T1SI los porcentajes de pérdida de peso fueron de 1.18 y 1.62 % para las probetas de tensión y flexión respectivamente. En general, a pesar de que el material fue expuesto más tiempo, la diferencia no es considerable entre el valor obtenido para T1SI y el correspondiente para T2SI. Se observa también, que el porcentaje de pérdida de peso fue mucho mayor cuando el material fue expuesto a envejecimiento acelerado (T1CI y T2CI), por ejemplo para las probetas de flexión se alcanzó una pérdida de peso de 2.35% para T1CI y de 2.05% para las probetas de tensión en el mismo tiempo, de manera similar al grupo SI los resultados para T2CI no difieren mucho con respecto a T1CI. La pérdida de peso puede deberse a que existe un daño en la superficie del material que permite el acceso de los hongos a la fibra natural.

Al comparar lo anterior con otros estudios similares realizados con WPCs, se ha observado que el hongo de pudrición blanca *Trametes versicolor* puede causar una disminución de hasta 6% y el hongo de pudrición café *Gloeophyllum trabeum* hasta 3% en materiales hechos con pino y HDPE [82]. También se han presentado estudios de pérdidas menores a 8% en WPCs elaborados con maple y HDPE con proporciones de 50 hasta 70% de madera con los hongos *Gloeophyllum trabeum*, *Trametes versicolor* y *Postia placenta* [35]. En otros estudios se sugiere que esos porcentajes son muy bajos ya que algunas WPCs pueden superar hasta 30% en pérdida de peso al ser sometidos

al ataque de hongos ^[11]. La diferencia en los resultados obtenidos en este estudio con los reportados en otras investigaciones depende de varios factores tales como: origen de la cepa de hongo y el tipo de hongo utilizado, especie de fibra natural o madera, proporción madera-plástico, tipo de polímero utilizado como matriz, el uso de aditivos, el proceso de elaboración de los compuestos, el tiempo de incubación de las muestras, el área de inoculación de la muestras, entre otros.

Tabla 4.1. Pérdida de porcentaje en peso para materiales de ambos grupos.

		%PP (SD)	
		T1	T2
Tensión	SI	1.18(0.080)	1.63(0.121)
	CI	2.05(0.1202)	1.98(0.043)
Flexión	SI	1.62(0.104)	1.87(0.046)
	CI	2.35(0.110)	2.32(0.073)

SD: Desviación estándar.

4.3 Propiedades mecánicas

4.3.1 Ensayos de tensión

Los resultados de las pruebas mecánicas para determinar la resistencia a la tensión para los materiales correspondientes a los grupos I y II se muestran en la Fig. 4.7. Se observa que esta propiedad se redujo de 14.83 MPa (T0SI) a 13.31 MPa (T1SI), lo que representa 11% de pérdida. Para el caso de T2SI la resistencia obtenida fue de 12.17 MPa, que representa una pérdida del 18% con respecto a T0SI. Para los materiales expuestos previamente a envejecimiento acelerado, se observó que la resistencia disminuyó de 11.83 MPa (T0CI) a 10.94 MPa (T1CI), lo que representa un pérdida del 7.5%; la resistencia disminuyó el 10% para T2CI (10.66 MPa) con respecto a T0CI.

Se puede observar el grupo I (T1SI y T2SI) tiene una pérdida de resistencia mayor (hasta del 18% en T2SI) con respecto a T0SI, que los materiales del grupo II (T2SI y T2CI) con respecto a T0CI cuya pérdida de resistencia no supera el 10%. Los resultados correspondientes a T2 muestran una mayor disminución de la resistencia aunque no es considerable, en comparación con otros trabajos que evalúan el biodeterioro de la fibra de bonote de coco, en los que se han reportado pérdidas mayores al 50% en la resistencia a la tensión atribuida a los hongos de pudrición blanca [18-21].

La diferencia en la pérdida de propiedades mecánicas es más notable entre los materiales sin y con exposición a envejecimiento acelerado (T0SI y T0CI respectivamente). Para T0SI la resistencia obtenida fue de 14.84 MPa y para T0CI fue de 11.82 MPa. Esta diferencia es de 3.02 MPa representa una pérdida en resistencia mecánica a tensión de 20.4% con respecto al material no expuesto.

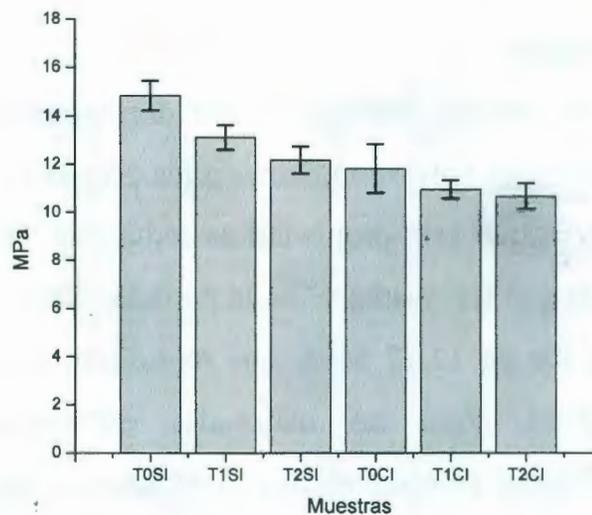


Figura 4.7. Resistencias obtenidas de los ensayos a tensión para ambos grupos (SI y CI).

Con respecto a los módulos elásticos, puede observarse un comportamiento similar (con respecto al tiempo de exposición a *P. chrysosporium*) a lo descrito sobre la resistencia a la tensión (Fig. 4.8). La disminución del módulo elástico fue menor a 25% para los dos casos de exposición a *P. chrysosporium*; la mayor pérdida se obtuvo a T2SI cuando la pérdida en el módulo disminuyó de 0.343 GPa (T0SI) a 0.259 GPa (T2SI). En el caso de los materiales expuestos previamente a envejecimiento acelerado, la máxima pérdida de módulo fue de 22.2% al disminuir de 0.289 GPa (T0CI) a 0.225 GPa (T2CI). Si comparamos las muestras sin y con exposición a envejecimiento acelerado (0.343 GPa para T0SI y 0.289 GPa para T0CI), la diferencia fue de 0.054 GPa con respecto a T0SI y esto representa una pérdida en el módulo del 15.7%. Estos resultados son menores si los comparamos con los de otros autores que han trabajado con WPCs y hongos de pudrición blanca y café, en dichos estudios se ha reportado que la pérdida de módulo elástico puede ser mayor y alcanzar hasta el 35% [54].

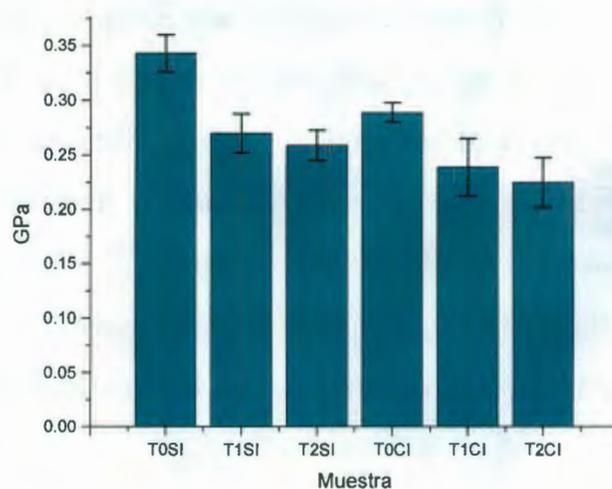


Figura 4.8. Módulos elásticos obtenidos de los ensayos a tensión para ambos grupos (SI y CI).

4.3.2 Ensayos de flexión

Como resultado de los ensayos de flexión, para los materiales sin exposición a envejecimiento acelerado la resistencia disminuyó de 16.03 MPa (T0SI) a 14.58 MPa (T1SI), lo que representa el 9.04% de pérdida con respecto a T0SI, y a 13.64 MPa para T2SI (pérdida de 14.91% con respecto a T0SI). En el caso de los materiales del grupo II (T1CI y T2CI) se dieron pérdidas en la resistencia del material similares a las del grupo I (T1SI y T2SI), por ejemplo en T2CI la resistencia fue de 10.89 MPa y con respecto a T0CI (13.07 MPa) la pérdida fue de 16.7%; esto se ilustra en la Fig. 4.9. No se observó mucha diferencia en el incremento de la pérdida de resistencia a pesar de que el material fue expuesto previamente a envejecimiento acelerado. Si comparamos estos resultados con los obtenidos en la literatura, otros autores han obtenido valores bajos en la pérdida de la resistencia cuando se trata de ensayos a flexión de WPCs expuestos directamente a un hongo de pudrición blanca o café. Estos autores han concluido que cuando la pérdida de peso es baja la disminución en la resistencia también lo es. También han concluido que esta disminución no es exclusivamente debida a los hongos, sino que la humedad también afecta al material, ya que la fibra natural puede absorber humedad durante el proceso de esterilización o durante el tiempo que se encuentre expuesto en el medio de incubación^[11, 82]. En este trabajo fue difícil impedir el efecto de la humedad, debido a que la humedad es un requisito para que ocurra la degradación enzimática de los hongos en la parte maderable de los WPCs.

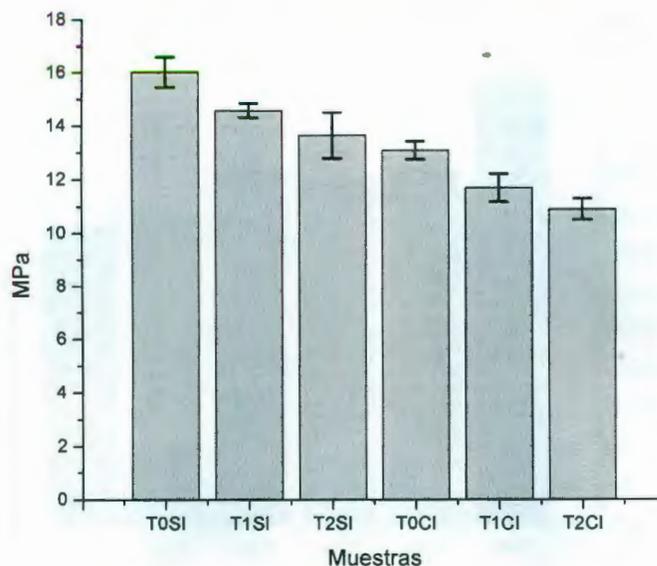


Figura 4.9. Resistencias obtenidas de los ensayos a flexión para ambos grupos (SI y CI).

En lo que se refiere a los módulos elásticos obtenidos a flexión se aprecia una pérdida menor a 22% para ambos grupos (Fig. 4.10). Por ejemplo, el módulo para T0CI fue de 0.461 GPa y para T1CI de 0.401 GPa, la diferencia es de 0.06 GPa que corresponde a una pérdida del 13.02% con respecto a T0CI. La mayor pérdida para el módulo elástico se dió en T2SI con 0.452 GPa (21.4% de pérdida con respecto a T0SI).

El envejecimiento acelerado por si solo provoca una disminución en el módulo elástico de 0.575 GPa (T0SI) a 0.461 GPa (T0CI), esto significa que el material perdió el 19.8% de su módulo elástico (con respecto a T0SI). La pérdida de módulo elástico es muy baja en ambos grupos (SI y CI), esto sugiere que el microorganismo *P. chrysosporium* no produce un daño severo en el comportamiento mecánico bajo flexión del material.

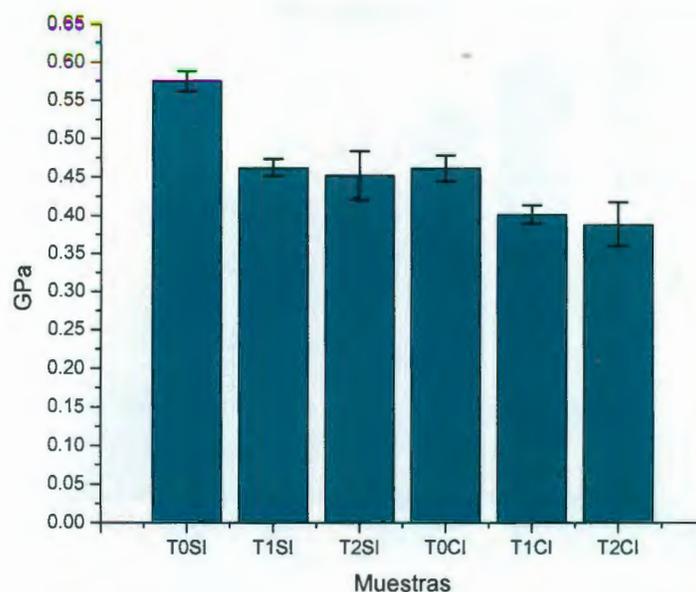


Figura 4.10. Módulos elásticos obtenidos de los ensayos a flexión para ambos grupos (SI y CI).

4.4 Microscopía electrónica de barrido

Las micrografías MEB de la superficie del material (probetas de tensión) de referencia para el grupo I (T0SI) se presentan en la Fig. 4.11. En esta figura se aprecia que la superficie del material es aparentemente lisa (Fig. 4.11a), pero también pueden observarse partes en las que existen fisuras como las que se señalan en la Fig. 4.11b; estas fisuras son propias del proceso de elaboración del material compuesto ^[83]. Se cree que estas fisuras o imperfecciones del material son las que sirven de acceso del microorganismo a la fibra ^[84].

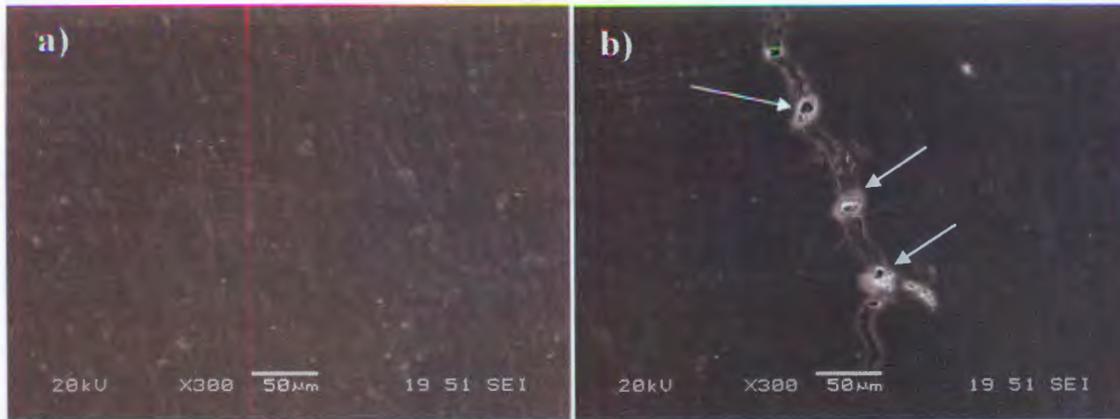


Figura 4.11. Micrografías del material de referencia (T0SI): a) Superficie aparentemente lisa, b) Fisuras sobre la superficie del material.

La Figura 4.12 presenta las micrografías de la superficie de los materiales del grupo I (T1SI y T2SI). En ambas micrografías se señalan cavidades con las fibras expuestas a la superficie, esto coincide con lo que se ha reportado en otros estudios con WPCs utilizando hongos de pudrición blanca y café. En dichos estudios se propone que las fisuras existentes en la superficie del material tienden a agrandarse y formar estas cavidades con el tiempo de exposición al microorganismo. Lo anterior podría ser tomado como un indicio de ataque del microorganismo al material [11, 75, 85].

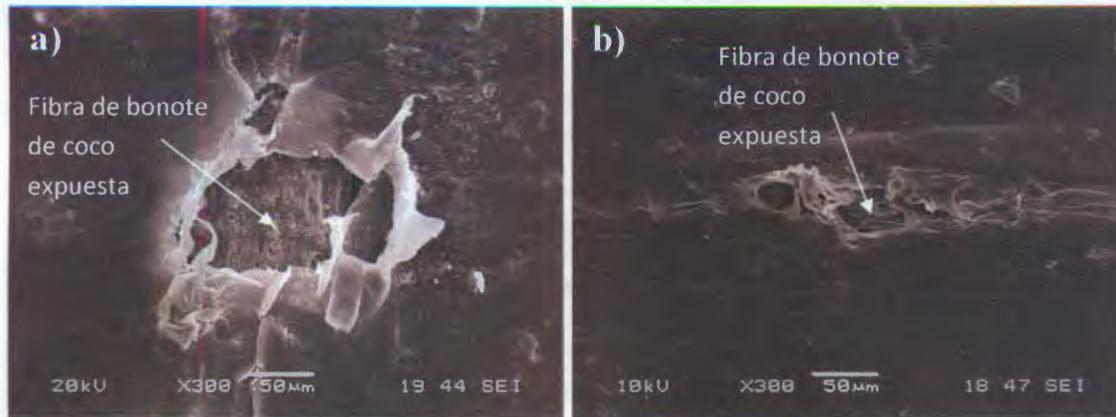


Figura 4.12. Micrografía de materiales expuestos a *Phanerochaete chrysosporium* (grupo I): a) T1SI, b) T2SI.

Cuando las fibras fueron expuestas a envejecimiento acelerado (T0CI) se produjeron grietas sobre la superficie del material (Fig. 4.13a) y en algunos casos las fibras quedaron expuestas y desprotegidas (Fig. 4.13b) debido a la degradación de la matriz polimérica de HDPE.

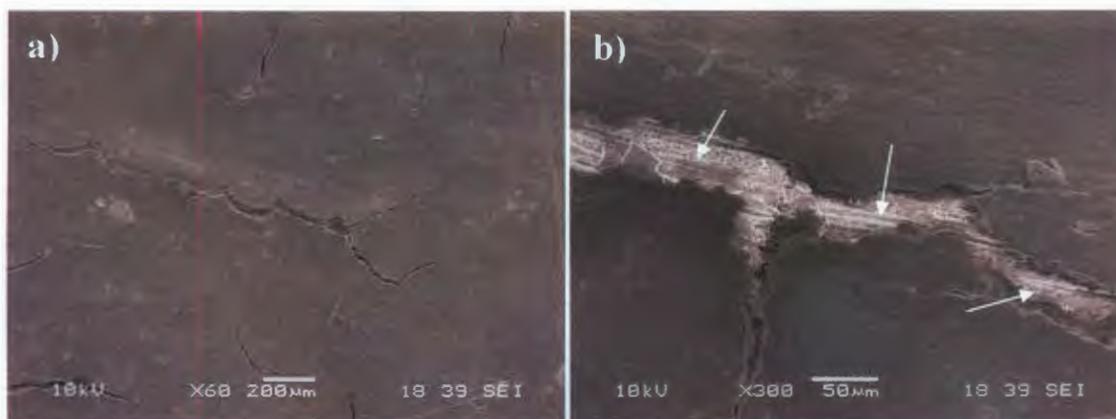


Figura 4.13. Micrografía típica de una muestra de material expuesto a envejecimiento acelerado (T0CI): a) Superficie agrietada del material, b) Exposición de la fibra de bonote de coco.

Con la superficie previamente dañada por el envejecimiento acelerado, es de esperarse que los materiales del grupo II sufrieran un daño mayor después de

ser incubado con *P. chrysosporium*. En estos materiales la exposición de las fibras es más evidente y el daño a las fibras expuestas es más severo, como se observa en la Fig. 4.14.

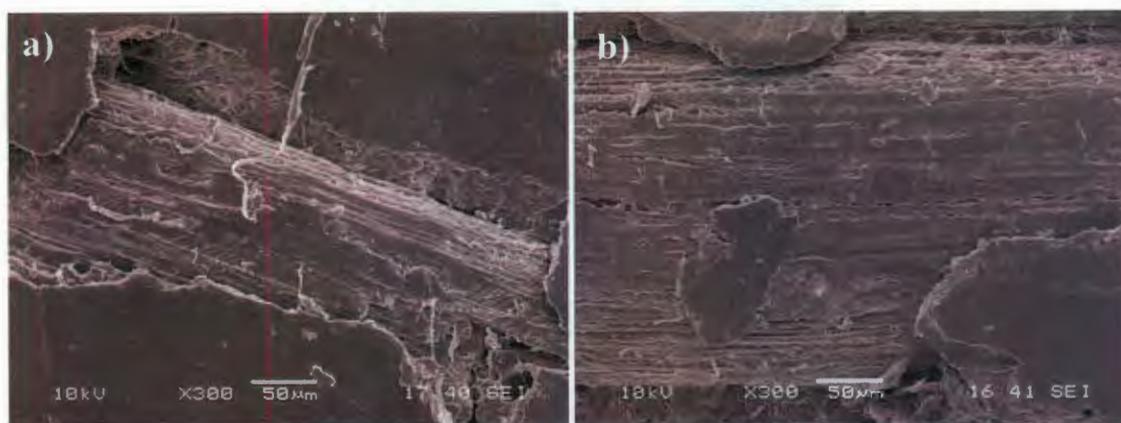


Figura 4.14. Micrografía de materiales expuestos a *Phanerochaete chrysosporium* (grupo II): a) T1CI, b) T2CI.

En la Fig. 4.15 se observan filamentos en una de las cavidades superficiales; estos filamentos son denominados hifas y en conjunto forman el micelio del hongo. Estos resultados concuerdan con los obtenidos en otras investigaciones similares con WPCs, en donde se expusieron los materiales a hongos de pudrición blanca y café; después del período de incubación, se observó mediante MEB el crecimiento de hifas, las cuales se concentraron en la superficie del material compuesto, esto debido a que es la zona expuesta en contacto directo con el hongo de prueba ^[83, 86]. Lo anterior probablemente se deba a la existencia de gradientes de humedad en el espesor del material compuesto, alcanzando contenidos de humedad bajos en la pared interna del material y mayor humedad en la superficie, por lo que las hifas de los hongos se concentran en esa zona ^[82, 83].



Figura 4.15. Micrografía del material correspondiente a T2CI que muestra la concentración de las hifas de *Phanerochaete chrysosporium*.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Los resultados del análisis por FTIR para ambos grupos de materiales, sugieren que durante la exposición al envejecimiento acelerado y a *P. chrysosporium* se generaron especies oxidativas que son responsables del deterioro de la fibra de bonote de coco. Se observó una reducción en las bandas asociadas a la presencia de lignina después de que el material fue expuesto a *P. chrysosporium*, esto se debe a que se trata de un microorganismo que degrada principalmente la lignina. Con respecto a la pérdida de peso, la disminución observada fue baja ya que se obtuvieron valores menores a 2.5 % siendo mayor para los materiales expuestos previamente a envejecimiento acelerado. Los resultados del ensayo a tensión muestran que la disminución de las propiedades fue menores a 18% para la resistencia y menores a 25% para el módulo elástico, en el caso de los ensayos a flexión se observó una disminución menor a 17 y 22%, para la resistencia y el módulo respectivamente. Estos resultados indican que cuando la pérdida de peso es menor la disminución de propiedades mecánicas también lo es. Por otro lado, las micrografías MEB mostraron que *P. chrysosporium* afecta superficialmente al material, siendo el daño mayor en el material expuesto previamente a envejecimiento acelerado.

Estos resultados muestran que el material estudiado en este trabajo es afectado superficialmente. A mayor tiempo de exposición el daño al material es mayor, sin embargo no es severo. El tratamiento con envejecimiento acelerado propicia la aparición de grietas en el material, lo que desprotege las fibras y facilita el acceso de *P. chrysosporium*. Es muy probable que la disminución en las propiedades mecánicas no sea exclusivamente provocada por el hongo ya

que esta pérdida de propiedades podría darse en conjunto con la humedad, que es un requisito para que ocurra la degradación enzimática de la fibra natural. Puesto que la afectación de las propiedades mecánicas del material estudiado no fue severa con *P. chrysosporium*, puede entonces suponerse que las posibilidades de que otro tipo de hongo lo afecte seriamente son muy bajas. Sin embargo, es necesario considerar otro tipo de pruebas que confirmen este hecho.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda lo siguiente para trabajos futuros sobre el tema de esta tesis:

- Sería interesante evaluar el impacto de *P. chrysosporium* cuando se incrementa la cantidad de fibra en el material compuesto para observar si existe un cambio significativo en las propiedades mecánicas.
- Incrementar el tiempo de exposición de envejecimiento acelerado a 2000 horas ya que este es el tiempo que se ha utilizado en otros trabajos con materiales compuestos y se ha propuesto como el tiempo idóneo para tener una pérdida de propiedades mecánicas considerable. Esto ayudaría a corroborar si el material que se estudió en esta investigación, efectivamente se deteriora con el grado de severidad reportado en dichos trabajos.
- Sería interesante considerar el tamaño de partícula como una variable, ya que en estudios recientes se ha observado que la pérdida de peso por el deterioro biológico decrece cuando el tamaño de partícula disminuye.

-
- A pesar de que se realizó una búsqueda exhaustiva de literatura, no se encontraron métodos estándares específicos para llevar a cabo bioensayos con hongos para materiales compuestos. Es por ello que en este trabajo se utilizó un protocolo establecido para materiales poliméricos. Sería interesante entonces, utilizar los métodos establecidos para la madera, puesto que el material objeto de la presente investigación, precisamente es considerado como un material alternativo sustituto de la madera, de ahí que en el argot se le refiera como “madera plástica”.

BIBLIOGRAFÍA

-
- [1] Navarro J., 2005. "*Elaboración y evaluación de tableros aglomerados a base de plástico de alta densidad y fibra de estopa de coco*". Tesis de licenciatura, Universidad de Colima. Coquimatlan, Colima, México.
- [2] Pérez M., 2007. "*Elaboración de matrices de polímeros reciclados reforzados con fibras de la estopa de coco y determinación de sus propiedades físicas y mecánicas*". Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- [3] http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_RSM01_03&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce (citado: 21/junio/2011)
- [4] Plan rector del sistema producto nacional palma de coco. SAGARPA, 2005. Disponible en : http://siic.ucol.mx/Archivos_prov%5Cprn_coco.pdf (citado: 21/junio/2011)
- [5] González R., 2006. "*Estudio de demanda nacional de pulpa, fibra y agua para la compactación de la oferta regional del cocotero*", CONACOCO, Disponible en: www.conacoco.com.mx, fecha de consulta: 23 de julio de 2010.
- [6] "*Natural fibers, biopolymers and biocomposites*", Editado por Amar K. Mohanty Misra y Lawrence T. Drzal, Taylor and Francis Group, Estados Unidos, 2005.
- [7] Bodiy J., B. Jayne, "*Mechanics of wood and wood composites*". Van Nostrand Reinhold Company, Estados Unidos, 1982.
- [8] Ortiz J., 2007, "*Obtención y caracterización de materiales compuestos termoplásticos reforzados con fibras cortas de coco*", Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico de Mérida, Mérida, Yucatán, México
- [9] Quintero G. L., González S. L., "*Uso de fibra de estopa de coco para mejorar las propiedades mecánicas del concreto*", Ingeniería & Desarrollo, 2006, 20:134–150.
- [10] Morton J., Quarmley J., Rossi L., "*Current and emerging applications for natural and composites*", 7th International Conference on Woodfiber-Plastic Composites, Madison, WI, USA, 2003, pag. 3–6.

-
- [11] Lomell M., Ochoa H., Fuentes F., García S., Cerpa M., Silva J., "Evaluation of accelerated decay of wood plastic composites by *Xylophagus fungi*", International Biodeterioration & Biodegradation, 2009, 63:1030–1035.
- [12] Oksman K., Sain M., *Wood-polymer composites*, Woodhead publishing, Estados Unidos, 2008.
- [13] Klyosov A., *Wood Plastic-Composites*, Editorial Willey, Estados Unidos, 2007.
- [14] Zaid L., 2004, "Estudio del biodeterioro en madera de *Eucalyptus globulus* Lab. Por método gravimétrico", Memoria de licenciatura, Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- [15] <http://www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/yucatan/municipios/31050a.html> (Citado 03/junio/2010).
- [16] <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/yuc/territorio/clima.aspx?tema=me&e31> (Citado 03/junio/2010).
- [17] Kanmani P., Karuppasamy P., Pothiraj C. and Arul V., "Studies on lignocelluloses biodegradation of coir waste in solid state fermentation using *Phanerocheate chrysosporium* and *Rhizopus stolonifer*", African Journal of Biotechnology, 2009, 24: 6880–6887.
- [18] Antheunisse J., "Decay of coconut fibres by soil microorganism", Journal of General and Applied Microbiology, 1981, 27: 435–442.
- [19] Antheunisse J., "The breakdown of coconut fibers by *trametes versicolor* and *stereum rugosum*", Journal of General and Applied Microbiology, 1980, 26:167–170.
- [20] Antheunisse J., Burema J., "Biological and chemical inhibition of lingo-cellulose decay by white rot basidiomycetes", Journal of General and Applied Microbiology, 1983, 29: 257–269.
- [21] Antheunisse J., "Observations on the decomposition of coconut fibres", Journal of General and Applied Microbiology, 1979, 25: 273–277.
- [22] Sugany S., Pradeep S., Subramanian J., "Bio-softening of mature coconut husk for facile coir recovery", Indian Journal Microbiology, 2007, 47:164–166
- [23] Uma L., Kalaiselvi R., Subramanian G., "Isolation of lignolytic bacterium for the degradation and possible utilization of coir waste", Biotechnology Letters, 1994, 16:303–308.

-
- [24] Rajan A., Senan R. C., Pavithran C., Abraham T.E., "Biosoftening of coir fiber using selected microorganisms", *Bioprocess Biosystems Engineering*, 2005, 28:165–173.
- [25] Odian G., *Principles of polymerization*, Editorial Willey-Interscience, 4ta. Edición, Estados Unidos, 2004.
- [26] Ramos M., María M., *Ingeniería de los materiales plásticos*, Ed. Días de Santos, España, 1988.
- [27] Garrido L., Ibarra L., Marco C., *Ciencia y tecnología de materiales poliméricos (volumen I)*, Ed. CSIC, 2004, España, 2004.
- [28] Singh D., Chen S., "The white-rot fungus *Phanerochaete chrysosporium*: conditions for the production of lignin-degrading enzymes", *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2008, 81:399–417.
- [29] Pandey K., "A study of chemical structure of soft and hardwood and wood polymers by FTIR spectroscopy", *Journal of Applied Polymer Science*, 1999, 71:1969–1975.
- [30] *Coconuts: production processing products*, 2da. edición, AVI publishing company Inc., Estados Unidos, 1979
- [31] Tejano E., "State of the art of coconut coir dust and husk utilization (general overview)", National Workshop on Waste Utilization, 1985.
- [32] Asasutjarit C., Charoenvai S., Hirunlabh J., Khedari J., "Materials and mechanical properties of pretreated coir-based green composites", *Composites: Part B*, 2009, 40:633–637.
- [33] Miravete A., *Materiales compuestos I*, Ed. Reverté S. A., España, 2007.
- [34] Askeland D. R., *Ciencia e ingeniería de los materiales*, Ed. Thomson., 4a. Ed., 2004.
- [35] Pendleton D., Hoeffard T., Adcock T., Woodward R., Wolcott M., "Durability of an extruded HDPE/Wood composite", *Forest Products Journal*, 2002, 52:21–27.
- [36] Morrell J., Stark N., Pendleton D., McDonald A., "Durability of wood-plastic composites", *Wood design focus*, 2006, 16:7–10.
- [37] Harper C., *Handbook of Plastics Technologies*, Mc Graw Hill, Estados Unidos, 2006.
- [38] Zweitel H., *Plastics Additives Handbook*, Hanser International, Alemania, 2001.

-
- [39] Rowell R., "*Challenges in Biomass-thermoplastic composites*", *Journal Polymer Enviromental*, 2008, 15: 229–235.
- [40] Schnabel W., *Polymer Degradation. Principles and Practical Applications*, Hanser Internacional, Alemania, 1981.
- [41] Ríos C., "*Materiales plásticos y biodegradabilidad*", *Ciencia y Desarrollo*, 2010, 39–43.
- [42] Sabatier J., 1992., "*Estudio de la deslignificación a la soda del bagazo*". Tesis doctoral. Instituto Cubano de Investigaciones de los derivados de la caña de azúcar. Ciudad de la Habana, Cuba.
- [43] Cottleb S., Pelczar Jr. M., *Microbiological aspects of lignin degradation*, College Park, Maryland.
- [44] Hammel K. E., *Fungal degradation of lignin*, Institute for Microbial and Biochemical Technology. Forest Products Laboratory, US department of agriculture. USA.
- [45] Morales R., 2006, "*Medios de cultivo líquidos para el desarrollo de inóculos de hongos de pudrición blanca aplicables en biopulpaje kraft*", Tesis de Licenciatura, Universidad de Chile, Facultad de ciencias forestales, Santiago de Chile.
- [46] Lobarzewski J., A. Paszczyński., "*Lignocellulose biotransformation with immobilized Cellulose D-glucose oxidase and fungal peroxidases*". *Enzyme and Microbial Technology*, 1985, 7: 564–566.
- [47] Olvera P., 2003., "*Aislamiento de levaduras que tengan la capacidad para degradar lignina y búsqueda de algunos genes implicados en dicha degradación*", Tesis profesional de maestría. Escuela de Ciencias, Universidad de las Américas. Puebla, México.
- [48] Steffen K., M. Hofrichter, A. Hatakka., "*Purification and characterization of manganese peroxidase from the litter-decomposing basidiomycetes *Agrocybe praecox* and *Stropharia coronilla**". *Enzyme and Microbial Technology*, 2002, 30:550–555.
- [49] Marnhão C., Miranda R., Galvão V., Da Silva S., Nascimento M., Bieber L., "*Natural resistance of five Woods to *Phanerochaete chrysosporium* degradation*", *International Biodeterioration & Biodegradation* 2010, 64: 711–715.

[50] Tien M., Kirk T., "*Lignin-degrading enzyme from Phanerochaete chrysosporium: purification, characterization, and catalytic properties of a unique H₂O₂-requering oxygenase*", Proc. National Academy Science, 1984, 81:2280–2284.

[51] Kawai S., M. Nakagawa, H. Ohashi, "*Degradation mechanisms of a nonphenolic-O-4 lignin model dimer by Trametes versicolor laccase in the presence of 1 hydrobenzotriazole.*" Enzyme and Microbial Technology, 2002, 30:482–489.

[52] Koroleva O., V. Gavrilova, E. Stepanova, V. Lebedeva, N. Sverdlova, E. Landesman, I. Yarmetdinov, A. Yaropalov., "*Production of lignin modifying enzymes by co-cultivated white-rot fungi Cerrena maxima and Coriolus hirsutus and characterization of laccasa from Cerrena maxima.*" Enzyme and Microbial Technology, 2002, 30: 573–580.

[53] Daina S., H. Orlandii, G. Bestetti, C. Wiik., G. Elegir. "*Degradation of lignin model dimers by Ceriporiopsis subvermispora*". Enzyme and Microbial Technology, 2002, 30:499–505.

[54] Wolcott M., Schirp A., "*Influence of fungal decay and moisture absorption on mechanical properties of extruded wood-plastic composites*", Wood and fiber science, 2005, 371:643-652.

[55] Gaylarde C., Ribas Silva M., Wrscheid T., "*Microbial impact of building materials: an overview*", Materials and structures, 2003, 36:342–352.

[56] Brischke C., Otto Rapp A., "*Influence of wood moisture content and wood temperature on fungal decay in the field: observartions in different micro-climates*", Wood Science Technology 2008, 42:663–677.

[57] Dawson–Andoh B., Matuana L., "*High density polyethylene-wood flour composite lumber: efficacy of two proprietary biocides in the control of fungal colonization and discoloration*", Holz Roh Werkst, 2007, 65:331–334

[58] Simonsen J., Freitag C., Silva A., Morrel J., "*Wood/plastic ratio: Effect on performance of borate biocides against a brown rot fungus*", Holzforshung, 2004, 58:205–208.

[59] Loría M., 1995, "*Determinación de las propiedades mecánicas de un material compuesto cargado con carbonato de calcio, sometido a diferentes condiciones de envejecimiento*, Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería Química, Mérida, Yucatán, México.

[60] Moreno M., 1997, "*Modificación y caracterización de la fibra de henequén con un agente promotor de adhesión*", Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería Química, Mérida, Yucatán, México.

[61] Martínez O., "*Obtención y caracterización de materiales compuestos a base de desechos de madera y polietileno de alta densidad*", Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico de Mérida, Mérida, Yucatán, México.

[62] Zizumbo D., Piñero D., "*Pattern of morphological variation and diversity in *Cocus nucifera L.* (*Arecacia*) in Mexico*", American Journal of Botany, 1998, 65:855–865.

[63] ASTM G21-96 (Reapproved 2002), "*Standard Practice for Determining Resistance of Synthetic Polymeric Materials to Fungi*", ASTM int., Phil., Pa, USA.

[64] ASTM D638 (2003), "*Standard Test Methods for Tensile Properties of Plastics*", ASTM int., Phil., Pa, USA.

[65] ASTM D790-02, "*Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*", ASTM int., Phil., PA, USA.

[66] ASTM G154-00, "*Standard Practice for Operating Fluorescent Light Apparatus for UV Exposure of Nonmetallic Materials*", ASTM int., Phil., PA, USA.

[67] ASTM D4329-99, "*Standard Practice for Fluorescent UV Exposure of Plastics*", ASTM int., Phil., PA, USA.

[68] Colom X., Carrasco F., Páges P., Cañavate J., "*Effects of different treatments on the interface of HDPE/lignocellulosic fiber composites*", Composites Science and Technology, 2003, 63:161–169.

[69] Gulmine J., Janissek P., Heise H., Akcelrud L., "*Degradation profile of polyethylene after artificial accelerated weathering*", Polymer Degradation and Stabiliby, 2003, 79:385–397.

[70] Gulmine J., Janissek P., Heise H., Akcelrud L., "*Test method: Polyethylene characterization by FTIR*", Polymer Testing, 2002, 21:557–563.

[71] Silverstein R., Webster F., Kiemle D., *Spectrometric Identification of Organic Compounds*, Ed. John Wiley & Sons, Inc., 7a. edición, Estados Unidos, 2005.

[72] Satoshi K., Kadla J., "*Hydrogen Bonding in lignin: A Fourier Transform Infrared Model Compound Study*", Biomacromolecules, 2005, 6:2815–2821.

-
- [73] Colom X., Carrillo F., Nogués F., Garriga P., "Structural analysis of photodegraded wood by means of FTIR spectroscopy", *Polymer Degradation and Stability*, 2003, 80: 543–549.
- [74] Mothé C., De Miranda I., "Characterization of sugarcane and coconut fibers by thermal analysis and FTIR", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2009, 97: 661–665.
- [75] Fabiyi J., McDonald A., Morrell J., Freitag C., "Effects of wood species on durability and chemical changes of fungal decayed", *Composites: Part A*, 2011, 42:501–510.
- [76] Pandey K., Pitman A., "FTIR studies of the changes in wood chemistry following decay by brown-rot and white-rot fungi", *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2003, 52:151–160.
- [77] Mohebbi B., "Attenuated total reflection infrared spectroscopy of white-rot decayed beech wood", *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2005, 55:247–251.
- [78] Mikulášová M., Kosíková B., Alexy P., Kacík F., Urgelová E., "Effect of blending lignin biopolymer of polyolefin plastics", 2001, 17:601–607.
- [79] Ferraz A., Baeza J., Rodriguez J., Freer J., "Estimating the chemical composition of biodegraded pine and eucalyptus Wood by DRIFT spectroscopy and multivariate analysis", *Bioresource Technology*, 2000, 74:201–212.
- [80] Fabiyi J., McDonald A., Wolcott M., Griffiths P., "Wood plastic composites weathering: Visual appearance and chemical changes", *Polymer Degradation and Stability*, 2008, 93:1405–1414.
- [81] Valadez A., Cervantes J., Veleza L., "Mineral filler influence on the photo-oxidation of high density polyethylene: I. Accelerated UV chamber exposure test", *Polymer Degradation and Stability*, 1999, 63:253–260.
- [82] Clemons C., Ibach R., "Laboratory tests on fungal resistance of wood filled polyethylene composites", *Annual Technical Conference*, San Francisco, CA, USA, 2002, Vol. 2, 2219–2222.
- [83] Fuentes F., Silva J., Ramos J., "Obtención de materiales compuestos empleando polímeros naturales", Departamento de madera, celulosa y papel CUCEI-UdeG, Editorial Amat, México, 2007.
- [84] Dawson-Andoh B., Matuana L., Harrison J., "Mold susceptibility of rigid PVC/Wood-fluor composites", *Journal of Vinyl & Additive Technology*, 2004, 10:179–186
- [85] Schauwecker C., Morell J., McDonald A., Fabiyi J., "Degradation of a Wood plastic composite exposed under tropical conditions", *Forest Products Journal*, 2006, 56(11/12):123–9.
- [86] Mankowski M., Morrell J., "Patterns of fungal attack in wood-plastic composites following in a soil block test", *Wood and Fiber Science*, 2000, 32:340–345.