



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**INGENIERÍA MECÁNICA – DISEÑO MECÁNICO**

**DESARROLLO DE UN MATERIAL COMPUESTO A TRAVÉS DEL ANÁLISIS FUNCIONAL  
PARA APLICACIONES EN INGENIERÍA**

**TESIS**  
**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**  
**DOCTOR EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:**  
**JESÚS VICENTE GONZÁLEZ SOSA**

**TUTOR**  
**DR. ARTURO BARBA PINGARRÓN-FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**COMITÉ TUTOR**  
**DR. MARCELO LÓPEZ PARRA-FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DR. ALEJANDRO CUAUTHÉMOC RAMÍREZ REIVICH-FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DR. ADRIÁN ESPINOSA BAUTISTA-FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DR. JOSÉ JAVIER CERVANTES CABELLO-FACULTAD DE INGENIERÍA**

**MÉXICO, D. F. SEPTIEMBRE 2013**

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Marcelo López Parra  
Secretario: Dr. Alejandro Cuauhtémoc Ramírez Reivich  
Vocal: Dr. Arturo Barba Pingarrón  
1<sup>er</sup>. Suplente: Dr. Adrián Espinosa Bautista  
2<sup>d</sup> o. Suplente: Dr. José Javier Cervantes Cabello

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Ciudad Universitaria, D.F. México

**TUTOR DE TESIS:**

Dr. Arturo Barba Pingarrón

-----

**FIRMA**

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Nacional Autónoma de México, a través de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, por ofrecer la gran oportunidad de realizar los estudios de Doctorado en Ingeniería.

A los miembros de mi familia en primer lugar a mis padres Vicente González Ramos, Isabel Sosa Hidalgo porque son las primeras personas que creyeron en mí apoyándome en todas y cada una de las metas que he podido desarrollar , a mi hermana Eva Isabel González Sosa por compartir momentos reflexivos y gratos para mi superación, a mi sobrino Jesús Jael Cortés González por compartir momentos de tranquilidad y de reflexión, a mi esposa Elizabeth Flores Aguilar, por todo el apoyo y comprensión brindado en el desarrollo y culminación de este trabajo.

A los miembros del comité de jurado, Dr. Marcelo López Parra, Dr. Alejandro Cuauhtémoc Ramírez Reivich, Dr. Arturo Barba Pingarrón, Dr. Adrián Espinosa Bautista y al Dr. José Javier Cervantes Cabello por aportar su experiencia en la revisión de este trabajo de tesis y por los comentarios y recomendaciones realizadas para la mejora del trabajo de investigación.

Al Dr. Arturo Barba Pingarrón por ser mi tutor en el desarrollo de este trabajo y ser la guía académica, profesional y personal.

A todas aquellas personas que han compartido sus conocimientos para formular el desarrollo de este trabajo y a los amigos que me han dado experiencias, apoyo y retroalimentación.

## INDICE

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.....	6
1.1 INTRODUCCIÓN .....	6
1.2 OBJETIVO .....	8
1.3 HIPOTESIS.....	8
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	8
1.5 APORTACIÓN.....	14
CAPITULO 2. ESTADO DEL ARTE.....	15
2.2 DESARROLLO.....	15
CAPITULO 3. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS MATERIAS PRIMAS EMPLEADAS PARA LA ELABORACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO. APLICACIÓN DEL ANÁLISIS FUNCIONAL.....	22
3.1 CONSIDERACIONES BÁSICAS .....	22
3.2 APUNTES SOBRE LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN EL COMPORTAMIENTO DE MATERIALES COMPUESTOS.....	28
3.3 ANÁLISIS FUNCIONAL .....	37
CAPITULO 4. PREPARACIÓN Y DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL.....	42
4.1 MATERIALES EMPLEADOS .....	42
4.2 PREPARACIÓN DE PROBETAS.....	46
4.2.1. MODELOS DE CAD Y SIMULACIÓN DE LAS PROBETAS PARA ENSAYOS MECÁNICOS.....	47

4.2.2. OBTENCIÓN DE PROBETAS PARA EL ENSAYO DE TENSIÓN.....	51
4.2.3. OBTENCIÓN DE LAS PROBETAS DE IMPACTO.....	52
4.2.4. OBTENCIÓN DE LAS PROBETAS DE DUREZA.....	52
4.3 TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN EMPLEADAS.....	53
5. PRESENTACION, DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	56
5.1 DEFINICIÓN DE LA CARACTERIZACIÓN .....	56
5.2 ENSAYOS MECÁNICOS.....	56
5.3 ANALISIS DE RESULTADOS.....	64
5.3.1. Análisis funcional .....	65
5.3.2. Material plástico .....	73
5.3.3. Aserrín.....	73
5.3.4. Separación (cribado) del aserrín .....	74
5.3.5. Observación macroscópico .....	76
5.3.7. Ensayos mecánicos .....	77
5.3.8. Observación microscopio .....	93
5.4. Aspectos generales del análisis de resultados .....	99
6. CONCLUSIONES .....	102
7. PUBLICACIONES OBTENIDAS DURANTE EL DESARROLLO CON EL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN .....	106
8. REFERENCIAS.....	108
9. ANEXOS .....	115

## CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

---

### 1.1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad la aplicación de nuevos materiales dentro de la ingeniería ha creado una variedad extensa de alternativas para la mejora de materiales y la creación de nuevos materiales cuyo propósito es el de aprovechar las propiedades y características que los hacen compatibles con las aplicaciones y con el medio ambiente, por ello se plantea el trabajo de doctorado denominado “Desarrollo de un material compuesto a través de análisis funcional para aplicaciones en ingeniería”, en donde se pretende obtener un material con ciertas características mecánicas que le permitan ser competitivo en el ámbito de la ingeniería de materiales con su aplicación en el diseño de productos enfocados a las comunidades rurales.

Desde el punto de vista del análisis funcional el propósito de este trabajo es el de lograr una fusión de la parte teórica con la experimental en donde los resultados de esta suma ofrezcan una pauta para el desarrollo de materiales, usando materias primas provenientes del reciclamiento y, por otro lado observar que una herramienta matemática empleada en el diseño puede colaborar a formular a detalle las propiedades mecánicas deseables de este material alternativo.

Por otro lado, el trabajo muestra de manera estructurada la aplicación teórica, matemática y experimental para la obtención de un material ambientalmente amigable y con características específicas dentro de su desarrollo.

Es bien sabido que la ingeniería de materiales tiene una amplia gama de enfoques para la caracterización, como lo son: a) caracterización física, b) caracterización mecánica, c) caracterización química (d) caracterización microestructural, etc. En este trabajo solo se aplicará la caracterización mecánica, evaluando las propiedades de

tracción, impacto, dureza y la microestructural con microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido.

Además, el trabajo que se muestra corresponde a una investigación dentro del área de la ingeniería basada en el desarrollo de un material compuesto con las características de ser elaborado exclusivamente con materia prima reciclada y de postconsumo para los dos elementos que lo componen, para el que representa al material base se hace uso del polipropileno y el material de refuerzo es madera de pino en forma de aserrín.

Este trabajo está organizado en 9 secciones denominadas capítulos, los cuales se describen a continuación.

Capítulo 1, Corresponde a la introducción general del trabajo, explicación del objetivo, hipótesis, justificación y aportación de la investigación realizada. El propósito de este capítulo es establecer los puntos de desarrollo en el trabajo del material compuesto para lograr una aplicación dentro de la ingeniería, pensando especialmente en comunidades rurales.

Capítulo 2. Este capítulo contempla la exposición del estado de arte, en donde se identifican las investigaciones relevantes en relación al tema de estudio, con las aportaciones sobresalientes por parte de autores a nivel mundial y que ofrecen parámetros tangibles para analizar, discutir, criticar y abordar para aplicarlos en el trabajo del desarrollo en el material compuesto. De este capítulo surgen elementos que amplían el campo de aplicación para este tipo de materiales en la ingeniería y son una parte importante del estudio.

Capítulo 3. Uno de los aspectos predominantes para un trabajo de esta índole radica en tener conocimiento acerca de los materiales a usar y las características a contemplar en un material compuesto, por ello en este capítulo se describen las consideraciones básicas de la materia prima y los elementos para el diseño y elaboración de un material compuesto en conjunto con sus características principales para su aplicación como tal.

Capítulo 4. Para el desarrollo del material, como ya se mencionó se requiere de una caracterización de éste por lo cual este capítulo muestra la forma en cómo se realiza la preparación del material compuesto para la parte experimental, este capítulo inicia con la forma de obtener la materia prima, su selección, la elaboración de probetas para su caracterización, un apartado de software virtual como un apoyo para el desarrollo del material en conjunto con sus propiedades mecánicas y las técnicas de caracterización que se aplican a la obtención del material compuesto.

Capítulo 5. Después de la descripción de las técnicas para caracterizar se describen los experimentos o ensayos y posteriormente se interpretan y analizan los resultados obtenidos en éstos. Se describe paso a paso la forma en cómo se llevan a cabo los ensayos de tracción, impacto, dureza y las evaluaciones mediante microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido, mostrando tablas y gráficas que enriquecen la comprensión de la caracterización realizada.

Capítulo 6. En este capítulo se plasman las conclusiones tanto generales del trabajo realizado para el desarrollo del material compuesto involucrando la parte matemática y dando pauta a las aplicaciones probables para este material generado.

Publicaciones. Una sección en donde se mencionan las publicaciones realizadas con información relevante para la presentación en revistas indexadas, congresos nacionales e

internacionales, al igual que en simposium de investigación, con el propósito de mostrar los resultados de las investigaciones, aplicaciones y desarrollo de este trabajo.

Bibliografía y referencias: aparece una sección denominada de esta manera en donde se ubica la información de todas las referencias consideradas para este trabajo,

Anexos. Una última sección es denominada anexos en donde se encuentra información extra utilizada para el desarrollo de la investigación, como lo son los datos de los equipos, normas y especificaciones.

A continuación se inicia la descripción del trabajo por medio del objetivo, hipótesis, justificación y aportación que tiene esta tesis.

## **1.2 OBJETIVO**

El objetivo de este proyecto es desarrollar un proceso por medio de una tecnología disponible, que permita generar un material compuesto, a partir de materias primas de re uso, esto es, polipropileno reciclado – madera (aserrín), a través de un procedimiento de fabricación sencillo y reproducible. Adicionalmente, caracterizarlo (especialmente en relación a sus propiedades mecánicas) y, en base a ello, proponer, utilizando análisis funcional, aplicaciones para el material producido, orientado a su uso en comunidades rurales.

## **1.3 HIPOTESIS**

Es posible generar un material compuesto amigable con el medio ambiente, con aserrín de pino y polipropileno reciclado de bajo costo, sin utilizar aditivos para incrementar la adherencia entre matriz y refuerzo, a través de un procedimiento sencillo que incluye opciones de combinaciones de procesos de extrusión e inyección, que presente propiedades mecánicas apropiadas para algunas aplicaciones de ingeniería y ser usado en comunidades rurales

## **1.4 JUSTIFICACIÓN**

Es bien conocido que los plásticos son materiales ampliamente utilizados en un sinnúmero de aplicaciones, por su versatilidad y sus atractivas características tales como ligereza, buen acabado y factibilidad de procesamiento. Cuando algún tipo de polímero se combina con alguna clase de refuerzo, por ejemplo, con algún tipo de madera apropiada, pueden modificarse diversas propiedades y, a partir de ello, dar un reuso al PP y así ampliar sus campos de aplicación. Si, adicionalmente se piensa, como es el caso de este proyecto, en el uso de material reciclado, el atractivo de los bajos costos se puede sumar a las condiciones anteriores, junto a las ventajas ambientales que esto conlleva.

Los materiales compuestos se aplican en diversas medidas en otros países y dado su potencial es conveniente introducirse al análisis y desarrollo de dichos materiales compuestos y sus posibilidades. Una herramienta útil en este sentido es el empleo del análisis funcional para este desarrollo, que permitirá una evaluación más adecuada de la conveniencia de su desarrollo y de sus posibilidades reales.

A continuación se señalan algunos datos sobre el consumo de plásticos y en particular referentes al polipropileno en México, como una fuente inicial para la evaluación de la importancia y factibilidad de esta propuesta. Inicialmente, en la figura 1.1 se muestra el porcentaje del consumo de los materiales plásticos más usados en AL.

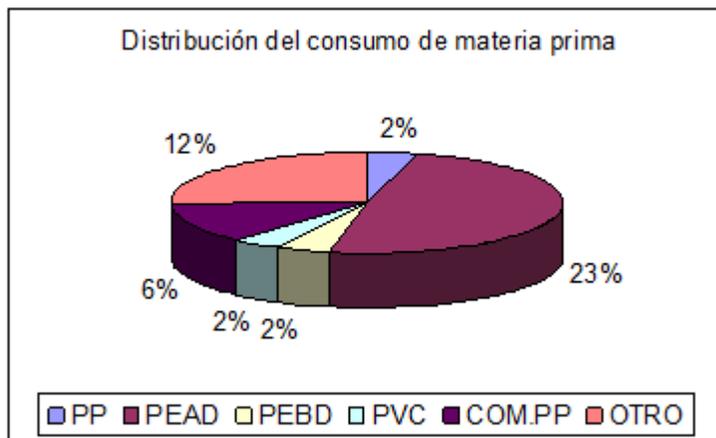


Fig. 1.1. Distribución del consumo de material plástico en AL (Jiménez Isabel, 2007)

De la figura 1.1 resulta evidente el lugar importante que tiene el consumo de PP en AL. En lo particular en México, el PP es un material plástico de muy amplio uso y que resulta por ello atractivo para la generación de un material compuesto a partir de PP de reuso. Es ampliamente utilizado en diversas industrias de acuerdo a lo mostrado en la figura 1.2.

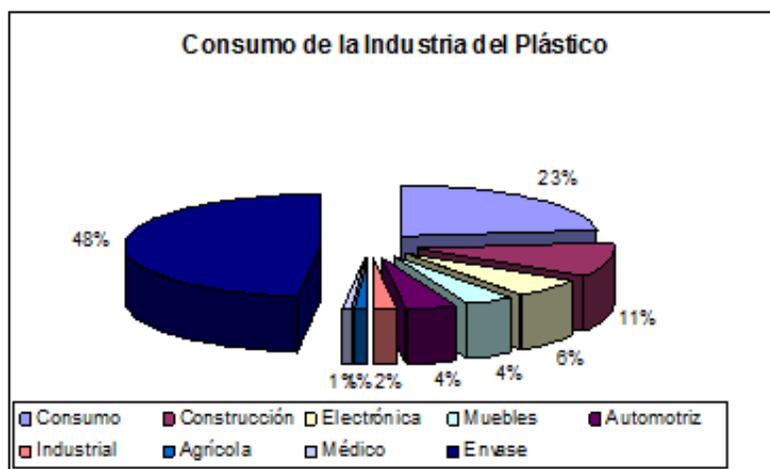


Fig. 1.2 Áreas industriales de consumo de polipropileno en México (2005). (Jiménez Isabel, 2007).

En figura 1.2 se observa la variedad de sectores en que se utiliza en el país, México, para procesarlo y obtener un producto determinado.

En las siguientes figuras 1.3 y 1.4 se describen gráficamente algunos aspectos importantes a considerar en específico del polipropileno (PP) comparado con algunos otros tipos de plástico respecto a su consumo nacional.

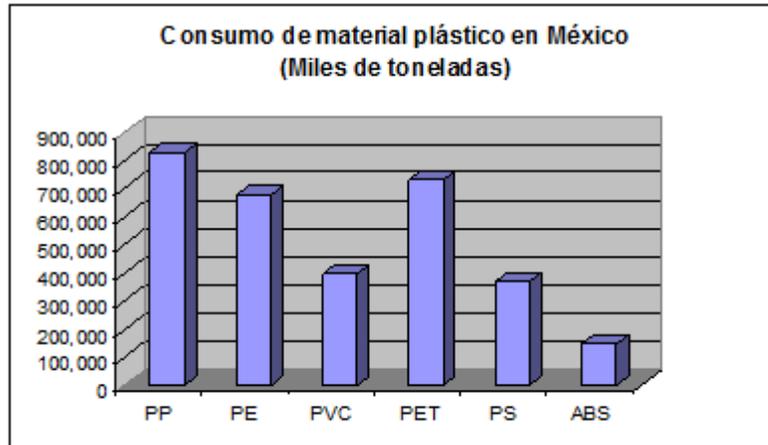


Fig. 1.3 Consumo de polipropileno y otros plásticos en México

En esta gráfica se muestran las cantidades de material plástico que se consume actualmente en México, en donde se puede observar la gran cantidad de material que puede ser aprovechado para el desarrollo de este proyecto, considerando al PP como un material apto a la aplicación. Y en la figura 1.4 se observa el desperdicio del material en México.

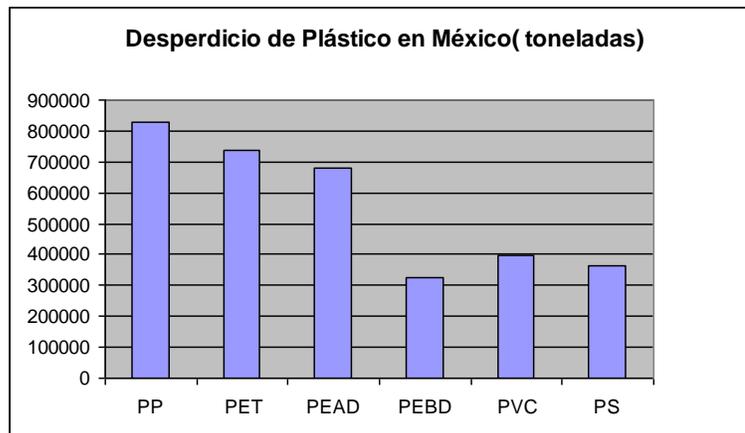


Fig. 1.4 Desperdicio del polipropileno y otros plásticos en México

A continuación se muestra la tabla 1 en donde se puede ver el porcentaje de reciclaje de un grupo de materiales plásticos en este país.

Tabla. 1 Comparativo del reciclaje de los materiales plásticos en México.

Plástico	Consumo plástico virgen [Ton]	Producción plástico reciclado [Ton]	Tasa de reciclado
PE	1,602,000	100,000	6.2%
PP	860,000	50,000	5.8%
PET	740,000	90,000	12.2%
PVC	415,000	18,000	4.3%
PS	363,000	5,000	1.4%
Técnicos	350,000	7,000	2.0%
Termofijos	320,000	0	0.0%
<b>Total</b>	<b>4,650,000</b>	<b>270,000</b>	<b>5.8%</b>

La principal fuente de desperdicio de Polipropileno (PP) proviene de las películas utilizadas para envasar botanas, sopas, galletas y pan. Como se menciona, los desperdicios de origen industrial, reciclados por varias firmas en México, como son recortes y películas fuera de especificaciones, son bien aceptados, e inclusive solicitados, también por sectores productores de bienes de consumo como artículos para el hogar, juguetes.

Por el contrario, respecto a las películas que provienen del postconsumo, son pocos los que se han aventurado a llevar a cabo el reciclaje para su aprovechamiento, ya que se requieren de muy buenos sistemas de lavado y filtrado para eliminar contaminación y tintas.

Otros productos como las tapas de bebidas carbonatadas que generalmente son de PP, sin ser el principal objetivo, han resultado ser uno de los productos que venden las firmas que reciclan PET, ya que siempre vienen presentes en las pacas que envían los acopiadores. Generalmente los interesados en adquirir este producto son productores de macetas y otros artículos para el hogar.

En relación a la situación de la madera en Centroamérica y en México, ésta se localiza en la zona de transición entre las especies de vegetación subtropical y templada. En esta sub-región las superficies forestales llegan a sumar 64.9 millones de hectáreas, de las cuales 38.5 millones son consideradas como productivas u operables, aunque apenas 300,000 están bajo manejo en Nicaragua y Honduras. México cuenta con aproximadamente el 60% de los bosques operables de la región, en total 14.2 millones de hectáreas. El 37% de los bosques operables de México son de coníferas, y éstas representan el 93% de los bosques naturales operables de coníferas de América Latina. Los recursos forestales de la región incluyen cerca de 1.5 millones de hectáreas de manglares, concentradas en un 75% en México y Panamá.

Se ha estimado que el volumen total del arbolado en pie para toda la superficie forestal de la sub-región es de 5,200 millones de m<sup>3</sup>; alrededor de 3,800 millones están dentro de los bosques operables, con 1,100 que corresponden a coníferas. Por hectárea se ha estimado que para los bosques de coníferas se cuenta con volúmenes de 75 a 200 m<sup>3</sup>, y para bosques templados y selvas tropicales de latifoliadas volúmenes de 110 m<sup>3</sup>. Se han establecido plantaciones alrededor de 185,000 hectáreas, a un ritmo de 30,000 hectáreas anuales. Sin embargo, se ha calculado que la deforestación es aproximadamente de 660,000 hectáreas anuales. (The Mexican Market for Treated Wood Products. Abel, Daft, Early & Ward International. 1997)

En la siguiente tabla 2 se muestra la superficie forestal en México.

Tabla 2. Superficies forestales, existencias volumétricas, incremento anual y producción maderable para México.

	Superficie Forestal [hax10 <sup>3</sup> ]	Existencias volumétricas [m <sup>3</sup> ] rollox10 <sup>2</sup>	Incremento anual volumétrico [m <sup>3</sup> ] rollox10 <sup>3</sup>	Producción maderable [m <sup>3</sup> ] rollox10 <sup>3</sup>	Consumo aparente* [m <sup>3</sup> ] rollox10 <sup>3</sup>
Bosques	27,508	1,987,352	27,344**	8,275	-
Selvas	11,406	1,135,863	11,359***	684	-
Total	38,914	3,123,215	38,703	8,959	9,998

\*Consumo aparente=producción nacional+importaciones-exportaciones

\*\*Se incluye únicamente el incremento anual para coníferas. No se tienen datos para latifoliadas.

\*\*\*Estimado como el uno por ciento de las existencias volumétricas.

En la tabla 2 se muestra la cantidad de hectáreas de tierra que producen los árboles, pino, para lograr establecer un aprovechamiento en un futuro, dependiendo de la función que tenga el material después de ser procesado.

A continuación se muestran unas gráficas de disponibilidad futura de la madera.

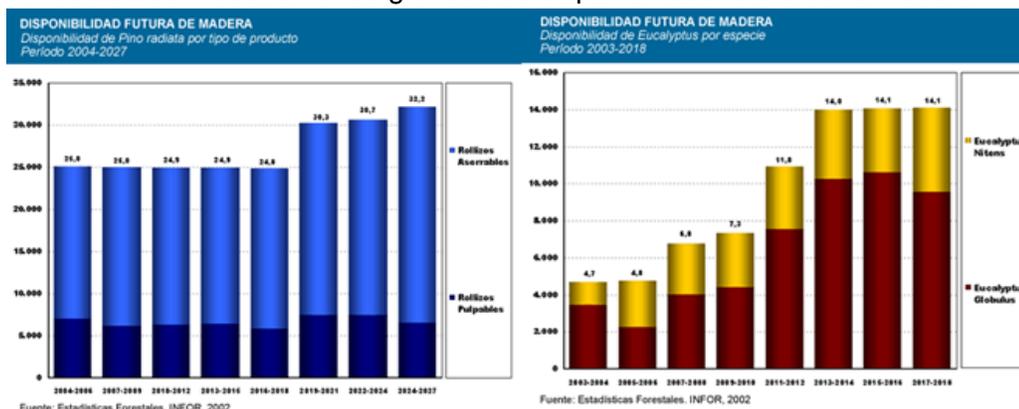


Fig. 1.5. Estadísticas comparativas de Eucalipto vs Pino (Eduardo O. Coronel, 2006)

El propósito de utilizar un material compuesto es para modificar o mejorar propiedades, en muchas aplicaciones se recurre al uso de refuerzos, como por ejemplo la fibra de vidrio u otras fibras, con el fin de expandir su uso a otros campos. Por ello es importante evaluar el material plástico con madera, que podrá ser en partículas muy pequeñas, polvo, hojuelas, que forman una alternativa de relleno para el plástico.

La principal motivación para el desarrollo de este tipo de materiales ha sido promover el uso y reciclaje de los materiales de desecho. De esta forma, los plásticos reforzados con madera se convertirán en una alternativa para reciclar el plástico ya usado y aprovechar el aserrín que se da como desecho del proceso de corte de las madereras.

Los primeros pasos en este terreno en América Latina, lo han dado instituciones de países como Chile, Argentina, Colombia y Brasil, que han desarrollado investigación de un material que combina el plástico con diversos tipos de maderas.

Uno de los aspectos más sobresalientes señalados en los proyectos de los países mencionados ha sido lograr la reducción de costos del material compuesto al elaborar algunos productos que se fabrican por medio de técnicas como la inyección y extrusión de plásticos.

Algo importante por mencionar es que la industria de compuestos de plástico y madera, que en algunos países ha desarrollado mercados con ventas superiores a los mil millones de dólares, está todavía por explotarse con mayor abundancia en los países de América Latina, por ello la importancia de involucrarse en este ámbito. Hasta estos momentos las principales iniciativas han sido generadas en estudios experimentales de laboratorio, pero los desarrollos en materias primas y aditivos elevan la pendiente en la curva de aprendizaje y por ello habrá que explotarlo en el menor tiempo posible.

Se ha encontrado que en los últimos años la investigación sobre los productos compuestos, plástico-madera, se han enfocado preferentemente a mejorar la interacción

físico-química entre los materiales altamente polares derivados de la madera y el plástico de baja polaridad por su naturaleza. La geometría de la madera también influye en las propiedades finales del producto. Las fibras lignocelulósicas incrementan la dureza y rigidez del compuesto siempre que la adhesión interfacial sea buena (Stara y Rowlands, 2003).

Algunos resultados que se han logrado de esta índole reportada en la literatura se muestran en las siguientes gráficas.

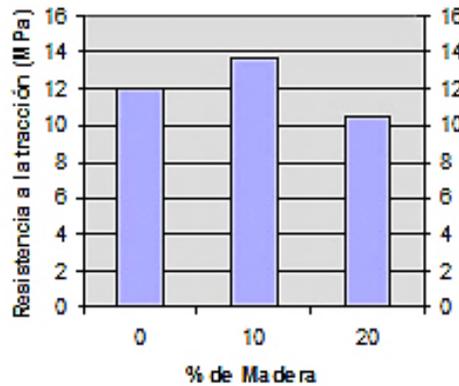


Fig. 1.6 Resistencia a la tracción de PP mezclado con madera de pino en forma de partículas (Stara y Rowlands, 2003).

Como se puede observar en la figura 1.6, la resistencia a la tracción de PP con madera da un resultado bastante aceptable, logrando un ligero aumento en su resistencia a la tracción, si se emplea el porcentaje adecuado de relleno.

De la gráfica anterior se puede observar que podría ser recomendable utilizar madera de hasta un 10% cuando se requiere un material de alta resistencia a la tracción.

Por otro lado, lo que se pretende en este proyecto es modificar algunas propiedades del material compuesto (PP-Pino), varios de los cuales se evaluarán en este estudio y se mencionan en la tabla 3:

Tabla. 3 Propiedades de los materiales compuestos

Propiedades para un material compuesto
<b>Vida útil</b>
Resistencia al impacto
Rigidez
Resistencia mecánica
Impermeabilidad
<b>Seguridad</b>
Resistencia a los choques
Resistencia al fuego
Aislamiento térmico
Aislamiento eléctrico
Amortiguamiento, vibraciones
<b>Diseño</b>
Integración de funciones
Formas complejas
Transparencia ondas electromagnéticas
Disminución del peso de las estructuras

Las propiedades mencionadas en la tabla 3 son utilizadas en los siguientes sectores:



Fig. 1.7 Aplicaciones de los materiales compuestos con materia prima de reuso. (Tecnología del plástico Volumen 20, 21, 2005)

Además, la producción de materiales compuestos se desarrolla rápidamente, aproximadamente con un crecimiento de +6% anual, en cantidad. Aunque su costo es más elevado en el caso de emplear materiales no reciclados, que el de los materiales plásticos tradicionales, como lo son PEAD, PEBD, PVC, aportan a sus usuarios importantes ventajas gracias a sus propiedades, en particular ligereza y la resistencia mecánica apropiada, al lado de una adecuada tenacidad. Tales ventajas han abierto a los materiales compuestos importantes mercados en la construcción de automóviles, la aeronáutica e incluso también en la construcción.

Los canales del desarrollo sostenible pasan ahora por el control de la totalidad del ciclo del producto, desde el diseño hasta el reciclaje, y también por la mejor caracterización de los productos y sus prestaciones.

## 1.5 APORTACIÓN

La principal aportación del proyecto es el desarrollo y generación de una tecnología de procesamiento que permita el reuso de materiales reciclados, sin tratamiento previo, para obtener una material de ingeniería que cumpla con las condiciones mecánicas requeridas para sus posibles aplicaciones en diversos sectores, particularmente de bajos recursos en áreas rurales. Es decir, a través de este proyecto, se plantea conjuntar preocupaciones ambientales con el desarrollo de un procesamiento sustentable y viable, en términos de factibilidad de procesamiento, (utilizando materiales reciclados disponibles), que cumplan con las características suficientes en propiedades, para cubrir una serie de especificaciones en el desarrollo de un material compuesto con estas características. Este desarrollo no está mencionado en la literatura y posibilitaría la generación de una industria nacional en este campo.

## CAPITULO 2. ESTADO DEL ARTE

---

En los siguientes párrafos se describen de manera factible las investigaciones sobresalientes en el tema y aportan puntos importantes para el desarrollo del trabajo en cuestión.

### 2.2 DESARROLLO

Alireza Ashori (2009) [3], investigó la viabilidad en usar el polietileno de alta densidad reciclado y el polipropileno, para fabricar los paneles compuestos. Reportan los efectos de la concentración de la fibra y de la adición de un agente acoplador sobre características tales como comportamiento bajo flexión, la absorción de agua y se determina que el uso de un adecuado agente de acoplamiento mejora la compatibilidad entre la fibra y las matrices plásticas, haciendo que las características mecánicas de los compuestos resultantes mejoren cuando se comparan con los productos vírgenes. Sin embargo, es notorio que para conseguir una respuesta adecuada del material compuesto se debe considerar la dirección de colocación de la fibra y que se genere una mejor adherencia de las materias primas, y por otro lado el tamaño de la fibra, ya que ello permite controlar de una manera más adecuada la producción del material compuesto.

Adhikary (2008) [1], investiga las características mecánicas y la microestructura de los compuestos de madera-plástico, que fueron elaborados usando el polietileno de alta densidad reciclado y virgen con el aserrín como relleno. El polietileno recolectado de la planta de reciclaje de los plásticos y el aserrín fue obtenido de un aserradero local. La estabilidad dimensional y de la resistencia de los compuestos puede ser mejorada aumentando el contenido del polímero o mediante la adición de agente acoplador. Según este autor, el uso de polipropileno es más adecuado para la generación de un compuesto y no el polietileno.

En el estudio realizado por Leu S. (2012) [45], la madera del material compuesto plástico reciclado (WRPC) se obtiene de las madererías y se combina con polietileno de alta densidad reciclado (HDPE). Se indica que la longitud de la fibra, la fracción en peso adicionada y el tratamiento superficial empleado, determinan las características mecánicas de los materiales de WRPC, y son factores fundamentales para el desarrollo de estos materiales compuestos. Por otro lado, las superficies de la fractura de los especímenes probados de WRPC se examinaron y el mecanismo de la fractura de los materiales WRPC aún se discute. Los resultados de la prueba indicaron que el material de WRPC con la fibra de madera tratada seguido por un tratamiento con silanos junto con el agente del acoplador de MAPP produce buenas características mecánicas. Sin embargo, es importante realizar más estudios para visualizar las posibles aplicaciones que se le podrán dar a los materiales denominados WRPC, tanto para el polietileno como para el polipropileno, haciendo hincapié que, según la opinión de este autor, interesa más analizar polipropileno reciclado y sobre todo sus propiedades mecánicas, para lograr realizar la comparativa con los datos de los materiales vírgenes de ambos casos; plástico y madera.

Xun Xu, Krishnan Jayaraman (2007) [84], reportan que los compuestos de polímeros reforzados con las fibras naturales han recibido atención cada vez mayor y con creciente interés. Fibras naturales tales como sisal, lino, yute y fibras de madera producen un buen reforzamiento cuando están combinados correctamente con polímeros apropiados. Para la generación de compuestos se consideraron tres contenidos de la fibra, de 10%, el 30% y el 50% en peso. Los resultados demostraron la densidad del material depende de los porcentajes usados. Se considera que es conveniente generar más combinaciones de la madera en cuanto a su composición en peso, ya que 3 niveles no arrojan datos suficientes en cuanto a la parte estadística que se genera para llevar a cabo una evaluación amplia del material compuesto.

De acuerdo con F. Vilaseca (2010) [81], los resultados de la experimentación, que se realizó en su trabajo, muestran que la adición del polipropileno favorece la incorporación de las cantidades relativamente altas de este refuerzo natural (madera) y promueve la transferencia de la tensión dentro del compuesto. Así, un aumento hasta 50% en peso de las fibras recicladas de la madera aumentó dos veces la resistencia última del material compuesto. Una comparación entre las características mecánicas y el costo final de compuestos de los PP con las fibras recicladas de madera o de la fibra de vidrio se ha considerado para el desarrollo de un material con refuerzos. Como dato de interés se debe establecer que la madera (aserrín), se maneje en una sola geometría en todas sus composiciones y que sea similar para cada uno de los ensayos en la obtención del material compuesto, ya que de esta geometría dependerán, en alguna medida, las propiedades de los materiales reciclados. Lograr una adecuada unión entre las fases del material es de suma importancia cuando se obtengan por medio de la transformación de plásticos, en específico para estos casos, la inyección.

M. D. H. Beg (2008) [6], encontró que para compuestos con 40% de fibra en peso, el límite de resistencia a la tracción y el módulo de Young tienen un valor menor y al momento de generar un tratamiento a las fibras de madera se logra un aumento de hasta el 25% para la tracción y el 17% para el módulo de Young (después de procesarlo ocho

veces). Además, las pruebas de flexión también fueron realizadas para 40% de fibra en compuestos, en donde se evalúa el comportamiento a la flexión y el módulo de Young, y se encontró que estos valores pueden disminuirse aumentando el tratamiento tanto de las fibras como del material plástico. El retratamiento se aplica para lograr un aumento en la estabilidad térmica. La orientación preferencial que puede adquirir el material compuesto como producto del proceso de inyección ó extrusión puede ser una vía para el conteo de sus propiedades.

En el estudio realizado por Kuang X. (2010) [42], los compuestos de polipropileno reforzados se prepararon por el proceso de extrusión de polipropileno con madera usando las proporciones siguientes: 15, 25, 40% en peso con dos granulometrías diferentes. Los especímenes se elaboraron por medio de procesos de inyección con dimensiones según norma ASTM. Se observó que aumentando el contenido de fibra, propiedades como el índice de fluidez (MFI) disminuyen, en tanto el módulo de elasticidad, la dureza y la densidad aumentaron. Los resultados mostraron que las propiedades de los compuestos son sumamente favorables cuando es comparado a otros sistemas comerciales reforzados por rellenos inorgánicos.

El trabajo de Faruk, Andrzej K. (2004) [9], muestra la viabilidad de usar fibra de madera como un relleno de microespumante en el polipropileno a través de un proceso de moldeo por inyección. El objetivo fue realizar el estudio para determinar la influencia del contenido de humedad sobre las propiedades en el ensayo de impacto para los compuestos de fibra en diferentes granulometrías de la madera en su estado virgen y reciclado. Es necesario controlar las características de la madera para obtener un material con un bajo contenido de humedad e igualmente tratar la madera para que se logre unir adecuadamente con el plástico y a la vez mejorar las propiedades correspondientes.

En otra investigación (Almaadeed (2012) [2], la modificación del aserrín se realizó con cantidades diferentes de ácido monocloroacético, y se combinó con el polipropileno en 10, 20 y 30% en peso. La introducción del aserrín no se modifica, ya que la madera disminuye el grado de cristalización de polipropileno, pero éste se mejora después de la introducción de ácido monocloroacético. Pruebas físicas y mecánicas mostraron efectos positivos sobre propiedades de tensión y de impacto obtenidas en el ensayo Charpy. Es notorio que al momento de preparar el aserrín se están modificando sus características por ello se logran mejoras en la adherencia de los materiales que determinan las propiedades mecánicas e ir disminuyendo cada vez más el grado de humectación que es común en los materiales compuestos sobre todo por los que contienen las fibras de madera, cuya propiedad que resalta es, justamente, la absorción de humedad.

Timothy G. Riasi (2007)[25], ha determinado que la utilización de las fibras lignocelulósicas de maderas duras con calidad baja ha incitado la consideración de nuevos compuestos basados en polímeros termoplásticos y gracias a todo ello se han obtenido resultados satisfactorios en cuanto se refiere al aprovechamiento de las materias primas, en este caso naturales y de post-consumo, con lo cual se pretende enfatizar en la forma de generar estos compuestos. La mayor parte del esfuerzo de desarrollo se ha enfocado a polímeros en materias primas como el polietileno y el polipropileno como la matriz. Este trabajo coherentemente ha demostrado la interacción limitada que es establecida entre las fases distintas, destacando la necesidad de definir factores que influyen en la adhesión.

Conforme vayan avanzando las investigaciones en este ámbito, la utilización de materiales reciclados para la aplicación de los materiales compuestos crecerá con mejores alternativas para sustituir a otros materiales.

Fujii Tomoyuki (2002)[77], encontró que los rellenos de madera se pueden dispersar en una matriz de PP con una tendencia hacia la orientación longitudinal y concéntrica, por un método de digestión química en su interfaz, aunque esto directamente no causará la vinculación química, por ello se sugiere que la unión química de rellenos de madera y la matriz PP sea más importante para la mejora de las propiedades de adherencia que la compatibilidad superficial y asimismo, analizar más a fondo el comportamiento mecánico de los materiales haciendo hincapié en el papel de la interfaz. La orientación de las fibras de madera es una de las características más importantes que se deben controlar.

En el trabajo de Robert Pecho (2006) [65], los resultados mostraron que la proporción de madera joven tiene un impacto sobre las propiedades físicas y mecánicas de material compuesto. El módulo de ruptura varió entre 29 MPa para la madera joven y 36 MPa para la madera madura. Los parámetros de la madera tanto juvenil como madura no son relevantes debido a que se debe generalizar el estado de la madera para ser aprovechada al máximo en su forma reciclada. Y esto hace referencia a un mayor control de la materia prima reciclada que se utilizará para la generación de nuevos materiales compuestos de esta índole en donde las características de las maderas jóvenes y maduras no deben reflejar grandes variaciones en el material a desarrollar, exclusivamente para el mejoramiento de las propiedades mecánicas de éstos.

Para comprender como el aserrín y características de la fibra influyen en las propiedades mecánicas de compuestos con polipropileno, Stark N. (2003)[74], investigó, el efecto de los diferentes tamaños de partículas de aserrín sobre las propiedades mecánicas del refuerzo y posteriormente llevó a cabo este mismo análisis con el aserrín y el polipropileno combinado. También se estudió el efecto de un polipropileno combinado con ácido maleico, que se usa como agente acoplador, sobre las propiedades del compuesto. Las partículas de harina de madera fueron adicionadas en un 40% en peso con el polipropileno. Aumentos de la resistencia a la tensión, flexión y el módulo de los compuestos de aserrín fueron encontrados. La energía de impacto aumentó con incremento del tamaño de partícula. Se encuentra realmente que un aspecto fundamental en el desarrollo del material compuesto es el de controlar la geometría del aserrín, ya que esto se relaciona directamente con la forma en cómo va a fluir el material cuando se encuentre en la etapa de fabricación de muestras a ensayar en su forma mecánica.

R. Cristian Neagu (2005)[60], menciona que una de las desventajas de las fibras a base de celulosa es su propensión a absorber el agua. Esto inevitablemente conduce a la inestabilidad dimensional no deseada del compuesto. La forma de resolver la humedad en estos materiales es el analizar los factores que conllevan a esta situación y para ello se requiere en si un proceso de secado tanto para el polipropileno como para el aserrín.

Zafeiropoulos (2002) [87], formula que las fibras naturales mucho tiempo han sido usadas como rellenos para producir reducción de gastos en la industria de plásticos. Hoy en día, se consideran, como un reemplazo potencial de fibras de vidrio para el empleo en materiales compuestos. Un problema serio de las fibras naturales es su carácter polar, que crea muchos problemas de la incompatibilidad con la mayor parte de termoplásticos

que forman la matriz. En los tratamientos superficiales, se ha encontrado que, son potencialmente capaces de vencer el problema de la incompatibilidad.

Dentro de la experimentación Ana Espert (2004) [23], menciona que las fibras del pino o la madera de eucalipto y también cosechas de un año como el bonote, el sisal, etc. son todos candidatos favorables para su aprovechamiento en los materiales compuestos. La absorción de agua es una de las desventajas de compuestos de fibras/polipropileno naturales. Nuevos compuestos de fibras/polipropileno naturales fueron hechos y la absorción de agua en ellos fue estudiada por la inmersión de los compuestos en el agua a tres temperaturas diferentes 23, 50 y 70°C. Una disminución en las características a tensión de los compuestos fue mostrada, observándose una gran pérdida en las propiedades mecánicas de las muestras saturadas por agua comparadas con las muestras secas. La importancia de utilizar el aserrín reciclado es la de aprovechar la mayor cantidad de aquel desperdicio que se genera en las madererías y que tiene que existir una selección de este aserrín para fortalecer aún más el desarrollo de los materiales compuestos.

E. McHenry (2003) [53], ha manejado la información de que la fibra de madera y los materiales compuestos de polipropileno fueron fabricados sin aditivo para determinar los efectos de fibra de madera sobre las propiedades mecánicas de los diferentes compuestos. Las materias primas usadas eran la fibra de madera dura de eucalipto, la fibra de nylon obtenida de medias, y el polipropileno (PP). Las pruebas fueron realizadas para determinar el límite de resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad. El límite de resistencia a la tracción de los compuestos basados en PP disminuyó considerablemente con el contenido creciente de fibra de madera. Es de suma importancia el desarrollar materiales compuestos madera - polipropileno sin aditivos para tener un acercamiento más real a los factores tanto naturales como mecánicos que presentarán estos materiales al ser evaluados y que si se agregarán aditivos se estaría forzando a tener un material con características más específicas y lo que se pretende es aprovechar lo existente, sin ningún tratamiento, para manipularlos después de obtener las propiedades mecánicas.

Andrzej K. Bledzki (2005) [10], enfatiza que la fibra de madera reforzó a los compuestos de polipropileno con contenidos de fibra diferente (40, 50 y 60% en peso). Los resultados indicaron que las propiedades de impacto fueron afectadas por el contenido de humedad. La energía de impacto Charpy se disminuyó y la resistencia máxima fue aumentada con el incremento del contenido de humedad. Los compuestos de fibra-PP, en donde las fibras de madera tuvieron una geometría de sección alargadas mostraron más resistencia al impacto.

En conclusión, el estado del arte refleja las siguientes particularidades, como parte primordial de dicha revisión, que da pauta al desarrollo de las investigaciones y aplicaciones de éstas mismas para la obtención del material compuesto de polipropileno y aserrín.

- La geometría del material de refuerzo, aserrín, debe controlarse de forma dimensional.
- La temperatura en los procesos de transformación de plásticos, se debe controlar.

- Como tendencia general, a mayor cantidad porcentual de aserrín, mayor resistencia a la tracción y aumento en el módulo de Young.
- Otra tendencia es que a mayor cantidad de aserrín, mayor es la resistencia al impacto.
- La orientación, (dirección), que toma la fibra durante el procesamiento con el material plástico es fundamental.
- El índice de fluidez disminuye conforme aumenta la cantidad de aserrín en el material plástico.
- Los rangos de porcentajes viables para el desarrollo del compuesto está dentro del 10 y 50% de madera en forma de aserrín.

De los puntos rescatables del estado del arte se coincide con los autores que los tipos de polímero que, en mayor medida se utilizan, para generar materiales compuestos polímero - madera son: a) Polietileno de alta densidad y b) Polipropileno, y en la mayor cantidad de los trabajos revisados se recomienda es el polipropileno por sus mejores propiedades mecánicas, fundamentalmente.

En relación a la madera a emplear, existen diversos tipos, de los cuales se tiene la siguiente lista, considerados como los más usuales para la fabricación de un material de ésta índole:

- Pino
- Eucalipto
- Cedro
- Oyamel

Para la obtención de los materiales compuestos existen procesos de transformación como lo son, los más usuales, la extrusión, inyección, termoformado, etc. Sin embargo, el proceso ideal para el desarrollo de los materiales compuestos es la inyección por las condiciones que tiene el proceso para ser controlado, como lo es la composición del material en peso, la presión con la cual se obtiene el material, las temperaturas y sobre todo la orientación del material a generar.

En lo referente a la unión entre estos dos materiales, plástico y aserrín, se revisa en los artículos, como se ha mencionado, la acción de diversos agentes acopladores entre los cuales se encuentran, primordialmente los silanos y el ácido maleico, encontrándose una frecuente mención de una mejora en la adhesión aunque su influencia en las propiedades mecánicas finales aun no es concluyente en los artículos,

Una de las características que más preocupación han generado en los investigadores, en los materiales compuestos mostrados en los artículos es la humedad ya que es factor predominante en este tipo de materiales, del cual también se señala como requisito deseable, un control muy estricto ya que tiene afectaciones sobre las propiedades mecánicas tales como los parámetros de tracción e impacto. Asociado a lo anterior, evidentemente se vuelve una operación necesaria, el adecuado procedimiento de secado.

Las composiciones que se establecen para este trabajo son consideradas, a partir de las experiencias de diversos autores reflejadas en los artículos y éstas son: 10, 20 y 40 por ciento de madera con su respectivo contenido de polipropileno.

El análisis de la fractura en estos materiales compuestos se sigue considerando como un método de caracterización complementario en estos materiales compuestos.

Una cierta tendencia que se puede resaltar en la evaluación de este tipo de materiales compuestos polímero - madera, que, con una proporción del orden del 40% de madera se reportan aumentos de alrededor de un 25% en la resistencia a la tracción y cercanos a un 20% en el Módulo de Young, y son algunos de los parámetros que se revisarán con el desarrollo de esta investigación para realizar la comparativa y poder evaluar eficientemente al material compuesto.

Lo mencionado en este apartado se toma en consideración para el desarrollo de la investigación y aplicación para la obtención del material compuesto y su caracterización.

## CAPITULO 3. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS MATERIAS PRIMAS EMPLEADAS PARA LA ELABORACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO. APLICACIÓN DEL ANÁLISIS FUNCIONAL.

---

### 3.1 CONSIDERACIONES BÁSICAS

En este apartado se explican brevemente algunas de las propiedades fundamentales de la materia prima a utilizar en la elaboración del material compuesto, en donde se mostrarán las propiedades del polipropileno y aserrín de pino, respectivamente.

#### Estudio de polipropileno.

El PP (polipropileno) es un polímero termoplástico con las siguientes propiedades generales.

Físicas:

- Densidad: El PP, en comparación con Polietileno, tiene una densidad más baja, permitiendo que su rendimiento en producción sea mayor. Su rango de densidad es de 0.902 a 0.906 g/cm<sup>3</sup>.
- Contracción de moldeo: la contracción del PP en el molde, es menor que la que sufre el polietileno, depende fundamentalmente de; temperatura de fusión y tiempo de sostenimiento. El rango de contracción del moldeo para PP es de 1 a 2% y debe tomarse en cuenta durante el diseño del molde, cuando se trate de trabajarlo por inyección y soplado.

- Absorción de agua: el PP, es un material que no absorbe humedad y no requiere secado previo a su transformación, manteniendo una buena estabilidad dimensional, incluso en ambientes con elevada humedad.
- Índice de fluidez: determina la elección del grado del material de acuerdo al proceso de transformación que se va a utilizar; también es una medida indirecta del peso molecular del material. A medida que es menor este valor, el peso molecular es mayor. Por el contrario, cuando el índice de fluidez es elevado, el peso molecular es menor, la rigidez aumenta y se facilita la inyección en piezas de diseños complicados.
- Propiedades de barrera, permeabilidad: las propiedades de barrera pueden visualizarse como ventaja o desventaja, dependiendo de la aplicación, cuando se tiene un valor conocido la comparación con otros materiales es de una gran utilidad, por ejemplo el PEBD es siete veces más permeable que el PEAD, mientras que el PP, presenta una permeabilidad intermedia.

#### Mecánicas:

- Resistencia a la tensión: la resistencia a la tensión del PP tiene un valor medio en comparación con los demás termoplásticos, la ventaja es que su resistencia se incrementa considerablemente durante el proceso de orientado para la fabricación de películas, rafia y cuerdas.
- Elongación: el PP tiene un excelente rango de elongación a la ruptura, fluctúa entre 400 y 430% utilizando cargas de 300 a 400 kg/cm<sup>2</sup>, lo que justifica el amplio uso de este material en la fabricación de películas y que hace posible su estiramiento en dirección máquina y transversal. Para rafia y cuerdas, solamente se hace el estiramiento en dirección máquina, que es de 6 a 8 veces mayor del tamaño inicial, produciéndose filamentos de elevada resistencia a la tensión.
- Resistencia al impacto: la resistencia al impacto izod del PP homopolímero es de 20 a 100 J/m y por esta propiedad se emplea para fabricar carcasas de electrodomésticos, gabinetes, portafolios, aspas para lavadoras y botellas.
- Resistencia a la flexión: el PP es un material semi rígido, su resistencia es de 600 kg/cm<sup>2</sup>, se utiliza para fabricar carcasas de aparatos, cajas y contenedores de alimentos.
- Módulo de flexión: es una medida de la rigidez del material. La presencia de los grupos metílicos en el PP, proporciona una mayor rigidez con respecto al polietileno, incluso por encima de los 100°C; se utiliza en la manufactura de popotes, cerdas para escoba y tapas con bisagra integrada.

- Resistencia a la compresión: esta propiedad indica la carga que soporta un plástico antes de deformarse. El PP presenta un valor de 500 kg/cm<sup>2</sup>.

#### Térmicas:

- Temperatura de reblandecimiento vicat (describe la temperatura a la que un cuerpo circular de una sección de 1 mm<sup>2</sup> y bajo una carga normada de 10 N o 50 N penetra exactamente 1 mm en la probeta). La temperatura de reblandecimiento Vicat se encuentra normalizada en ISO 306 y ASTM D 1525), el PP presenta resistencia a la temperatura por períodos cortos sin deformarse en temperaturas arriba de 150°C, puede ser esterilizado con rayos gamma y óxido de etileno. Por otro lado, en el proceso de metalizado se manejan elevadas temperaturas que el material soporta sin deformarse. Haciendo una comparación, la temperatura de reblandecimiento del polietileno de baja densidad es de 86°C, del polietileno de alta densidad 127°C y PP 150°C; debido a su resistencia se utiliza para envasar mermeladas.
- Temperatura de deformación bajo carga: este material a 110°C soporta 4.5 kg/cm<sup>2</sup>, es utilizado en la fabricación de piezas mecánicas como engranes, cafeteras eléctricas y freidoras. Con una temperatura de 55°C soporta una carga de 18.5 kg/cm<sup>2</sup>, pero si se refuerza con cargas de fibra de vidrio, talco o carbonato de calcio, la temperatura aumenta hasta 150°C. Se emplea para fabricar tableros automotrices, parrillas para auto y piezas mecánicas.
- Conductividad térmica: el PP presenta un valor muy pequeño de conductividad, ya que el calor que absorbe lo transmite lentamente; esto se refleja en ciclos más largos de enfriamiento durante su transformación.
- Resistencia al calor continuo: es la capacidad que presentan los plásticos para soportar elevadas temperaturas libres de esfuerzos mecánicos. De los plásticos commodities, el PP es el material que más resistencia posee, por ello es muy utilizado en la industria automotriz en partes como la caja del acumulador.
- Calor específico: es la cantidad de calor que se necesita para elevar un grado centígrado, la temperatura de un material por unidad de peso. El PP presenta un valor elevado de calor específico, consumiendo más energía para su transformación y enfriamiento.

#### Ópticas:

El PP por naturaleza es traslúcido y su transmitancia es de 70 a 75%. Las piezas moldeadas en este material sin pigmentar presentan mayor transparencia que las fabricadas a partir de PEAD.

Esto se debe a que existe menor densidad en las zonas amorfas y cristalinas del PP, cuya densidad es de 0.85 g/cm<sup>3</sup> y de 0.94 g/cm<sup>3</sup> para el polietileno. A pesar de poseer una transmitancia pobre, ésta pasa a valores de 96-98% en el caso de película

biorientada y de 87 a 90% en recipientes soplados cuando se emplean agentes clarificantes.

#### Eléctricas:

La constante dieléctrica es la capacidad de los materiales plásticos para almacenar la energía dentro de ellos. El PP es un material que acumula muy poca energía, por ello es que puede ser utilizado en circuitos eléctricos y electrónicos. Sin embargo, al compararlo con el polietileno, presenta dos desventajas, la primera químicamente, el cobre y otros metales catalizan la descomposición y segundo se vuelve frágil a temperaturas de  $-10^{\circ}\text{C}$

#### Químicas:

Presentan excelente resistencia a los ácidos y bases fuertes o débiles, sólo lo ataca el ácido nítrico concentrado por arriba de los  $80^{\circ}\text{C}$ . Pocos solventes orgánicos pueden disolverlo a temperatura ambiente.

Cuando existen condiciones de trabajo con temperaturas altas con presencia de sustancias químicas corrosivas, se utiliza como polímero PP, en lugar del polietileno.

#### Modificaciones con aditivos:

El PP al igual que los demás polímeros, necesita de aditivos para incrementar la facilidad de procesamiento y mejorar sus propiedades, obteniendo nuevas aplicaciones. Los aditivos que se utilizan, más comúnmente, para el PP son:

- Agentes nucleantes: el PP es un material cristalino, en el que un porcentaje significativo del tiempo de enfriamiento en el molde corresponde a tiempo requerido para la formación de cristales. Al incorporar un agente nucleante al PP, éste proporcionará una rápida formación de cristales de menor tamaño, logrando reducir el tiempo del ciclo e incrementar la claridad del producto. Por otra parte, se disminuyen las marcas de hundimiento o rechupes.
- Antiestáticos: el PP es un material susceptible de desarrollar cargas estáticas después de remover el producto moldeado. En un ambiente seco, esta carga puede llevar largo tiempo en disiparse, además de atraer partículas de polvo en suspensión, las cuales se depositan, en forma imperceptible, en la superficie del producto. Un agente antiestático incorporado como aditivo en el material permite una descarga de la carga estática en forma rápida.
- Antioxidantes: su función es inhibir o retardar el mecanismo de degradación por oxidación, provocado por las altas temperaturas de procesamiento que van desde los  $200$  a  $280^{\circ}\text{C}$ , proporcionando estabilidad al polímero que depende del grado de material.
- Estabilizadores a la luz UV: evitan la degradación de los plásticos causada por la radiación ultravioleta proveniente de la luz solar. El PP, en comparación con los demás poliolefinas, es sensible a la radiación U.V. los absorbedores de luz

ultravioleta que se utilizan para PP son: fosfitos, fosfatos, benzotriazoles en una cantidad de 0.05-0.3%.

- Lubricantes: tienen como función disminuir el esfuerzo del husillo para transportar y comprimir los pellets, así como minimizar la fricción de la masa fundida con la maquinaria. El tipo de lubricante empleado para PP, es interno-externo como estearato de zinc, ya que lubrica a escala molecular y superficial. Se aplica en cantidades de 0.25 a 1.0%. Para fabricar película se utilizan como lubricantes externos el monoesterearato de glicerol y los ésteres montánicos.
- Modificadores de impacto: aumentan la resistencia al impacto del polímero, ya que proporcionan características de elasticidad, absorbiendo los golpes que recibe el punto. El PP utiliza como modificador el hule EPDM en un 5 al 15%.
- Retardantes a la flama: el PP tiene una flamabilidad intrínseca UL-94HB. Los retardantes a la flama inhiben las características de flamabilidad de los plásticos. Para el PP, los compuestos bromados son los más utilizados en porcentajes de 3 a 15%.

#### Estudio de la madera ( aserrín de pino ).

- La madera se compone de un 50% de carbono (C), 42% de oxígeno (O), 6% de hidrógeno (H), 2% de resto de Nitrógeno (N) y otros elementos.
- Todo esto se compone formando la celulosa y la lignina.
- La celulosa: un polisacárido estructural formado por glucosa que formada por parte de la pared de las células vegetales.
- Es muy resistente a los agentes químicos, insolubles en casi todos los disolventes y además inalterables al aire seco.

#### Tipos de madera

La madera proviene de dos grandes grupos de árboles:

- a) Maderas de angiospermas, latifoliadas, hojosas o de hoja caduca. Ejemplo: caoba, encino, chicozapote, cedro rojo, etc.
- b) Maderas de gimnospermas o coníferas. La madera de pino, xcadra, oyamel, etc.

En México la madera de pino es la más abundante en el mercado y la más comúnmente usada en la construcción. A continuación se describen de manera general los diferentes tipos de madera existente.

#### Madera rolliza

También llamada madera sin elaborar, es de uso bastante frecuente en México en construcciones rurales y tradicionales. Se emplea en andamios, cimbras y obras falsas

de diversos tipos. Un ejemplo bastante exitoso de este producto es el caso de las líneas de transmisión de energía eléctrica y de teléfono.

#### Madera labrada

Se obtiene dándole la forma requerida con hacha o azuela. Las piezas de madera labrada son todavía de uso común en las construcciones rústicas, aunque es de esperarse que esta manera de elaborar la madera sea sustituida por la aserrada, puesto que la elaboración de la madera labrada implica desperdicios importantes. Los miembros de madera labrada generalmente son piezas relativamente robustas utilizadas como vigas, postes, pilotes cabezales de caballetes para puentes.

#### Madera aserrada

En México aproximadamente el 8% procede de las especies coníferas. Algunas otras especies de las que se obtiene madera aserrada son la caoba, el cedro, el ayacahuite, el encino y el nogal. En nuestro país, a diferencia de lo que ocurre en otras naciones, la mayor parte de la madera aserrada se destina a obras provisionales de diversos tipos (cimbras y obras falsa). En México son poco frecuentes las estructuras permanentes a base de madera.

#### Madera Plástica (WPC, por sus siglas en inglés).

- Composición de la madera plástica
- Polietileno de baja densidad
- Polietileno de alta densidad
- PET
- Otros plásticos como el poliestireno, PVC, polipropileno, etc.

Existen fabricantes de perfiles plásticos de alta densidad y gran resistencia como la plastimadera los cuales pueden ser utilizadas como sustitutos de madera natural.

En la industria ganadera con corrales, cercas, vallas y caballerizas para todo tipo de ganado. En la industria automotriz para la fabricación de pisos de camiones y tráiler, cajas de redilas y redilas plásticas de gran duración. En la industria de los muebles, especialmente de intemperie para pisos, palapas, camastras, muelles, y más.

Las ventajas sobre la madera y los conglomerados son variadas: son resistentes, durables, estéticos, económicos, reciclables, ecológicos, libres de mantenimiento. Además son fáciles de instalar. Están hechas a prueba de putrefacción, son impermeables por lo que no absorben contaminantes, no se astillan son ideales para trabajar productos perecederos.

#### Características físicas de la madera plástica

La madera plástica es un producto muy similar a la madera natural, pero además resistente a la corrosión, al agua, al ataque bioquímico y a la intemperie.

Presenta buena resistencia mecánica y estabilidad dimensional, es higiénica, irrompible y es libre de mantenimiento. La madera plástica se trabaja de manera similar a la madera natural; puede cortarse con serrucho, segueta y sierra eléctrica. Puede ser torneada, cepillada, canteada, perforada y atornillada con las mismas herramientas con las que se trabaja la madera natural (Enrique Cruz Benedetti, 2009).

### **3.2 APUNTES SOBRE LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN EL COMPORTAMIENTO DE MATERIALES COMPUESTOS**

El campo de los materiales compuestos se ha desarrollado de manera exponencial y por ello la importancia de generar cada vez más materiales con estas características que, a su vez, los hacen competitivos con los materiales de ingeniería conocidos.

Muchas tecnologías modernas requieren materiales con una combinación inusual de propiedades, imposible de conseguir, en varios de los casos, con los metales, las cerámicas y los polímeros convencionales.

Las combinaciones de propiedades de los materiales y la gama de sus valores se han ampliado, y se sigue ampliando, mediante el desarrollo de materiales compuestos, también denominados composites.

En términos generales se considera que un material compuesto es un material que conserva una proporción significativa de las propiedades de las fases constituyentes de manera que presente la mejor combinación posible.

Científicos e ingenieros, a la hora de diseñar materiales compuestos, han combinado ciertos metales, cerámicas y polímeros para producir características apropiadas de los materiales compuestos.

Algunos de estos materiales compuestos se han creado para mejorar la combinación de propiedades mecánicas tales como rigidez, tenacidad, y resistencia a la tracción a temperaturas ambiente y a elevadas temperaturas.

Adentrándose un poco más a la esencia de un material compuesto, se considera que la mayoría de estos materiales están formados por dos fases:

1. Una, llamada matriz, es continua y rodea a la otra fase.
2. Denominada fase dispersa o, más frecuentemente, refuerzo

Las propiedades de los compuestos son función de las propiedades de las fases constituyentes, de sus propiedades relativas y de la geometría de las fases dispersas. Geometría de la fase dispersa, significa, la forma, el tamaño, la distribución y la orientación de las partículas.

La clasificación de los materiales compuestos se enlista en tres divisiones de la siguiente manera:

- Compuestos reforzados con partículas
- Compuestos reforzados con fibras
- Compuestos estructurales

Y existen dos subdivisiones de cada una de ellas; las partículas de la fase dispersa de los materiales compuestos reforzados con partículas son equiaxiales (es decir, las dimensiones de las partículas son aproximadamente iguales en todas las direcciones); la fase dispersa de los materiales compuestos reforzados con fibras tienen la geometría de una fibra (es decir, una relación longitud-diámetro muy alta). Los materiales compuestos estructurales son materiales compuestos combinados con materiales homogéneos.

A continuación se describe la clasificación de los materiales compuestos:

1) Materiales compuestos reforzados con partículas.

Estos materiales se subdividen en reforzados con partículas grandes y consolidadas por dispersión.

El término grande se utiliza para indicar que las interacciones matriz-partícula no se pueden describir a nivel atómico o molecular, sino mediante la mecánica del medio continuo. En la mayoría de los materiales compuestos la fase dispersa es más dura y resistente que la matriz y las partículas de refuerzo tienden a restringir el movimiento de la matriz en las proximidades de cada partícula.

Las partículas de los materiales compuestos consolidados por dispersión normalmente son mucho más pequeñas; los diámetros tienen de 10 a 100 nm.

-Materiales compuestos con partículas grandes.

Algunos materiales poliméricos a los que se han añadido un relleno son realmente materiales compuestos con partículas grandes. En este caso, el material de relleno modifica o mejora las propiedades del material base y/o sustituye una parte del volumen del material polimérico por un material más barato, el relleno.

Para el caso de estos materiales las partículas pueden tener una gran variedad de geometrías pero suelen presentar aproximadamente la misma dimensión en todas las direcciones (equiaxiales). El reforzamiento es tanto más efectivo cuantas más pequeñas sean las partículas y cuanto mejor distribuidas estén en la matriz.

Por otro lado, existen expresiones matemáticas para relacionar el módulo de elástico con la fracción de volumen de las fases constituyentes de un material compuesto de dos fases.

Las ecuaciones de la regla de las mezclas predicen que el valor del módulo elástico está comprendido entre un máximo y un mínimo.

$$E_c = E_m V_m + E_p V_p \dots\dots\dots(1)$$

$$E_c = \frac{E_m E_p}{V_m E_p + V_p E_m} \dots\dots\dots(2)$$

Dónde: E y V representan el módulo elástico y la fracción de volumen, respectivamente, y los subíndices c, m y p significan material compuesto, matriz, fase partícula.

Los elastómeros y los plásticos se refuerzan frecuentemente con materiales en forma de partículas.

-Materiales compuestos con sólidos por dispersión.

La resistencia y la dureza de los metales y de las aleaciones metálicas pueden aumentarse mediante la dispersión uniforme de finas partículas de materiales duros e inertes en cantidades adecuadas.

Algo por mencionar, es que el aumento de resistencia por dispersión no es tan pronunciado como el endurecimiento por precipitación; sin embargo, el incremento de resistencia se mantiene a elevada temperatura durante prolongados periodos de tiempo, porque las partículas dispersas se escogen por su no reactividad con la fase matriz.

2) Materiales compuestos reforzados con fibras.

Tecnológicamente, los materiales compuestos con fases dispersas en forma de fibras son los más importantes. A menudo se diseñan materiales compuestos reforzados con fibras con la finalidad de conseguir elevada resistencia y rigidez a baja densidad.

Las características ya mencionadas se expresan mediante los parámetros de resistencia específica y módulo específico, que corresponden, respectivamente, a las relaciones entre la resistencia a la tracción y el peso específico y entre el módulo de elasticidad y el peso específico.

Los materiales compuestos reforzados con fibras se subclasifican por la longitud de la fibra.

Influencia de la longitud de la fibra.

Existe una longitud de fibra crítica para aumentar la resistencia y la rigidez del material compuesto.

Esta longitud crítica  $l_c$  depende del diámetro  $d$  de la fibra, de la resistencia a la tracción  $\sigma_f$  y de la resistencia de la unión matriz-fibra (o resistencia a la cizalladura de la matriz)  $\tau_c$ , de acuerdo con:

$$l_c = \frac{\sigma_f d}{\tau_c} \dots\dots\dots(3)$$

Las fibras con  $l$  mucho mayor que  $l_c$  se denominan discontinuas o fibras cortas. En fibras discontinuas de longitud significativamente menor que  $l_c$  la matriz se deforma alrededor de la fibra de modo que apenas existe transferencia del esfuerzo y el efecto del reforzamiento de la fibra es insignificante

Las mejores propiedades de los materiales compuestos se consiguen con la distribución uniforme de la fibra.

Las propiedades de un compuesto con fibras alineadas tienen carácter altamente anisotrópico, esto es, depende de la dirección en que se miden.

En estas condiciones, la carga total soportada por el compuesto  $F_c$  es igual a las cargas soportadas por la fase matriz  $F_m$  y por la fase fibra  $F_f$ .

$$F_c = F_m + F_f \dots\dots\dots(4)$$

Teniendo en cuenta la definición de esfuerzo,  $F = \sigma A$ , es posible obtener las expresiones de  $F_c$ ,  $F_m$  y  $F_f$  en función de sus respectivos esfuerzos ( $\sigma_c$ ,  $\sigma_m$ ,  $\sigma_f$ ).

Aplicando dichas expresiones, se tiene:

$$\sigma_c A_c = \sigma_m A_m + \sigma_f A_f \dots \dots \dots (5)$$

Dividiendo todos los términos por el área de la sección del compuesto,  $A_c$ ;

$$\sigma_c = \sigma_m \frac{A_m}{A_c} + \sigma_f \frac{A_f}{A_c} \dots \dots \dots (6)$$

Si las longitudes del compuesto, de la matriz y de las fibras son iguales,  $A_m/A_c$  es equivalente a la fracción de volumen de la matriz,  $V_m$  y  $A_f/A_c$  es equivalente a la fracción de volumen de las fibras  $V_f$ .

$$\sigma_c = \sigma_m V_m + \sigma_f V_f \dots \dots \dots (7)$$

En un estado de isodeformación se cumple:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m = \varepsilon_f \dots \dots \dots (8)$$

$$\frac{\sigma_c}{\varepsilon_c} = \frac{\sigma_m}{\varepsilon_m} V_m + \frac{\sigma_f}{\varepsilon_f} V_f \dots \dots \dots (9)$$

Si las deformaciones del compuesto, de la matriz y de la fibra son todos elásticos, se cumple:

$$\frac{\sigma_c}{\varepsilon_c} = E_c \dots \dots \dots (10)$$

$$\frac{\sigma_m}{\varepsilon_m} = E_m \dots \dots \dots (11)$$

$$\frac{\sigma_f}{\varepsilon_f} = E_f \dots \dots \dots (12)$$

Siendo las E los módulos de elasticidad de las respectivas fases, de lo que resulta.

$$E_c = E_m V_m + E_f V_f \dots \dots \dots (13)$$

Ya que el compuesto sólo consta de matriz y de fibras; esto es,

$$V_m + V_f = 1 \dots \dots \dots (14)$$

El módulo de elasticidad de un material compuesto reforzado con fibras continuas y alineadas en la dirección de alineamiento es igual a las fracciones de volumen multiplicadas por los módulos de elasticidad de ambas fases. Algunas otras propiedades, como la resistencia a la tracción, también dependen de las fracciones de volumen.

También puede demostrarse, para cargas longitudinales, que la relación de la carga soportada por las fibras y la soportada por la matriz es.

$$\frac{F_f}{F_m} = \frac{E_f V_f}{E_m V_m} \dots\dots\dots(15)$$

Carga transversal: un material compuesto con fibras continuas y orientadas se puede cargar en la dirección transversal; esto es, la carga se aplica perpendicularmente a la dirección de la fibra alineada.

En esta condición, el compuesto y ambas fases están expuestos al mismo esfuerzo  $\sigma$ .

$$\sigma_c = \sigma_m = \sigma_f = \sigma \dots\dots\dots(16)$$

Se denomina estado isotensionado.

La deformación del material compuesto es:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m V_m + \varepsilon_f V_f \dots\dots\dots(17)$$

Pero ya que

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \dots\dots\dots(18)$$

$$\frac{\sigma}{E_c} = \frac{\sigma}{E_m} V_m + \frac{\sigma}{E_f} V_f \dots\dots\dots(19)$$

Dividiendo ambos miembros por el esfuerzo  $\sigma$ .

$$\frac{1}{E_c} = \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_f}{E_f} \dots\dots\dots(20)$$

Se reduce a:

$$E_c = \frac{E_m E_f}{V_m E_f + V_f E_m} = \frac{E_m E_f}{(1 - V_f) E_f + V_f E_m} \dots\dots\dots(21)$$

Esta ecuación es análoga a la del límite inferior de compuestos con partículas.

-Materiales compuestos con fibras discontinuas y alineadas.

Aunque la eficacia del reforzamiento con fibras discontinuas es inferior a la originada por fibras continuas, los materiales compuestos reforzados con fibras discontinuas y alineadas tienen una importancia cada vez mayor.

En los compuestos con fibras discontinuas, alineadas, uniformemente distribuidas y con  $l$  mayor que  $l_c$ , la resistencia a la tracción longitudinal  $(TS)_c$ , cumple la siguiente relación:

$$(TS)_c = (TS)_f V_f \left(1 - \frac{l_c}{2l}\right) + (TS)'_m (1 - V_f) \dots \dots \dots (22)$$

Dónde:  $(TS)_f$  y  $(TS)'_m$  representan la resistencia a la fractura y la tensión en la matriz cuando el material compuesto se rompe.

Si la longitud de la fibra es menor que la crítica ( $l < l_c$ ) el valor de la resistencia longitudinal es:

$$(TS)_c = \left(\frac{l\sigma_c}{d}\right) V_f + (TS)'_m (1 - V_f) \dots \dots \dots (23)$$

donde  $d$  es el diámetro de la fibra.

-Materiales compuestos con fibras discontinuas y orientadas al azar.

Cuando los materiales compuestos tienen fibras orientadas al azar, estas suelen ser discontinuas y cortas.

En estas circunstancias, el módulo elástico se expresa mediante una regla de las mezclas:

$$E_c = kE_f V_f + E_m V_m \dots \dots \dots (24)$$

$K$  es el parámetro de eficiencia de la fibra que depende de  $V_f$  y de la relación  $E_f/E_m$ . desde luego, esta magnitud es inferior a la unidad y ordinariamente del orden de 0.1 a 0.6. el módulo elástico de los materiales reforzados, tanto si las fibras están alineadas como si están orientadas al azar, aumenta al incrementarse la fracción de volumen de la fibra.

Resumiendo, los compuestos con fibras alineadas son anisotrópicos y la máxima resistencia (reforzamiento) se consigue a lo largo de la dirección de alineación (longitudinal). En la dirección transversal el reforzamiento mediante fibras prácticamente no existe; la rotura suele ocurrir a esfuerzos de tracción relativamente bajos. Los esfuerzos aplicados en otras direcciones encuentran resistencias comprendidas entre estos extremos.

Las consideraciones sobre la orientación y la longitud de las fibras de un compuesto particular dependen del nivel y de la naturaleza del refuerzo aplicado y el costo de fabricación. Las velocidades de producción de compuestos con fibras cortas (alineadas y orientadas al azar) son rápidas y se pueden conformar piezas de formas intrincadas que no son posibles con refuerzos de fibras continuas.

-Materiales compuestos estructurales.

Un material compuesto estructural está formado tanto por materiales compuestos como por materiales homogéneos y sus propiedades no sólo dependen de los materiales constituyentes sino de la geometría del diseño de los elementos estructurales.

### Diseño y análisis de materiales compuestos

En una conferencia organizada por la Engineering Society de Detroit en diciembre de 1985, un empresario de una empresa automovilística estimó y señaló: *“el impacto de los materiales compuestos en la industria automovilística igual, si no mayor que el causado por la electrónica. Tan alta expectación es buena para nuestra tecnología. Deberíamos dedicarnos a promover el uso de los materiales compuestos en tantas líneas como sea posible”*.

La aplicación de los materiales compuestos puede ser mayor si se disminuye el costo y se simplifica el diseño. Y asimismo se pueden relacionar posteriormente los diseños con el análisis y por ultimo favorecer el costo de este tipo de materiales de nueva era.

El principal aspecto del diseño de materiales compuestos consiste en aprender a utilizar las propiedades en función de la orientación del laminado. La aproximación escalar para el diseño de materiales isótropos es aceptable porque la rigidez y la resistencia pueden representarse por el módulo de Young y la tensión uniaxial, respectivamente. El coeficiente de Poisson puede suponerse constante, 0.3. la resistencia del material ante esfuerzos combinados puede calcularse mediante criterios como von Mises o Tresca, necesitándose únicamente un dato en cada caso: la tensión uniaxial o la resistencia al corte.

Algunas de las características más sobresalientes de los materiales compuestos son la alta rigidez y la elevada resistencia específica. La idea consiste en establecer las relaciones funcionales de estas variables y mostrar el modo de llevar a cabo el diseño de materiales compuestos con todas sus características mecánicas, considerando que la configuración idónea en general, es el material compuesto unidireccional.

Una de las leyes más importantes para el desarrollo de un material compuesto es la conocida “Ley de Hooke generalizada”, la cual considera una relación lineal tensión-deformación para un material anisótropo. Se obtiene a partir de la energía elástica como un postulado básico de la teoría de la elasticidad. Es conveniente usar la notación indicial.

La forma de aplicar la Ley de Hooke, es a través de la matriz de rigidez para materiales compuestos, la cual se expresa de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (25)$$

La matriz mostrada es la que representa a un material compuesto, considerándolo anisótropo, sin embargo, con algunas consideraciones energéticas se dan casos específicos en donde las 36 constantes pueden ser reducidas de acuerdo a los diferentes casos de simetría existente en el material compuesto, a continuación se mencionan las siguientes simetrías y su expresión matemática.

- a) Simetría monoclinica
- b) Simetría ortótropa
- c) Simetría transversalmente isótropa
- d) Simetría isótropa

En el caso de la simetría monoclinica la matriz de esfuerzo para rigidez es:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & C_{36} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{54} & C_{55} & 0 \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (26)$$

Para la simetría ortótropa el comportamiento de la matriz de rigidez se da de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (27)$$

Ahora con relación a la simetría transversalmente isótropa, la matriz se coloca de la manera en la que se describe a continuación.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{32} & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (C_{22} - C_{23}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (28)$$

En lo relacionado con la matriz de rigidez para la condición de simetría isótropa, se tiene.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{11} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{32} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(C_{11} - C_{12})}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(C_{11} - C_{12})}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(C_{11} - C_{12})}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \dots\dots (29)$$

Para el caso de estudio en el material compuesto se ha de considerar la característica de que cumple con el caso ortotrópico, debido a que las fibras del material de refuerzo se orientan en una sola dirección.

Constantes ingenieriles.

Las expresiones  $C_{ij}$  en función de las constantes ingenieriles, vistas desde los criterios de la matriz de rigidez, toman la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 C_{11} &= (1 - \nu_{23}\nu_{32})\gamma E_1 \\
 C_{22} &= (1 - \nu_{31}\nu_{13})\gamma E_2 \\
 C_{33} &= (1 - \nu_{21}\nu_{12})\gamma E_3 \\
 C_{12} &= (\nu_{12} + \nu_{13}\nu_{32})\gamma E_1 = (\nu_{21} + \nu_{23}\nu_{31})\gamma E_2 \dots\dots\dots(30) \\
 C_{13} &= (\nu_{13} + \nu_{12}\nu_{23})\gamma E_1 = (\nu_{31} + \nu_{32}\nu_{21})\gamma E_3 \\
 C_{23} &= (\nu_{23} + \nu_{21}\nu_{13})\gamma E_2 = (\nu_{32} + \nu_{31}\nu_{12})\gamma E_3 \\
 C_{44} &= G_{23}, C_{55} = G_{31}, C_{66} = G_{12} = E_6
 \end{aligned}$$

En donde:  $\gamma = 1/(1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{32}\nu_{23} - \nu_{13}\nu_{31} - 2\nu_{21}\nu_{13}\nu_{32})$

$\nu$ : corresponde al coeficiente de Poisson

$E$ : módulo de elasticidad longitudinal

$G$ : módulo de cortadura, modulo cortante

Parte importante de la descripción realizada establece que la ley de Hooke generalizada en tres dimensiones puede ser simplificada por la presencia de simetrías del material y la adecuada orientación del sistema de referencia. Sin embargo, el comportamiento del material viene dado más por el número de componentes distintas de cero que por el número de constantes independientes. El uso inconsistente de esta notación puede llevar a complicaciones y confusiones innecesarias. Asimismo, se debe estar seguro cuando se definan los coeficientes de acoplamiento. Normalmente, se utilizan las dos definiciones representadas por las ecuaciones anteriores ya descritas.

**Material ortotropico**

Un material ortotrópico tiene tres diferentes propiedades en tres diferentes direcciones perpendiculares entre sí, y tiene solo tres planos perpendiculares entre sí que definen la simetría de las propiedades del material. Un material ortotrópico, tendrá tres diferentes propiedades del material en las direcciones X, Y, Z. Por ejemplo, el módulo de Young se tendrá que definir en tres direcciones:  $E_x, E_y, E_z$ . Por lo tanto, los planos XY, YZ y ZX deben formar los planos de simetría de las propiedades del material. Un material ortotrópico también puede ser homogéneo o heterogéneo. En un cuerpo ortotrópico homogéneo, las propiedades del material en una dirección particular serán las mismas en todos los puntos dentro del cuerpo, mientras que en un cuerpo ortotrópico heterogéneo las propiedades del material en una dirección particular serán diferentes en cualquier otro punto del material en el cuerpo. Algunos materiales elásticos son anisótropos, lo cual

significa que su comportamiento elástico, en concreto la relación entre tensiones aplicadas y deformaciones unitarias, es diferente para diferentes direcciones. Una forma común de anisotropía es la que presentan los materiales elásticos ortotrópicos en los que el comportamiento elástico queda caracterizado por una serie de constantes elásticas asociadas a tres direcciones mutuamente perpendiculares. El ejemplo más conocido de material ortotrópico es la madera que presenta diferente módulo de elasticidad longitudinal (módulo de Young) a lo largo de la fibra, tangencialmente a los anillos de crecimiento y perpendicularmente a los anillos de crecimiento. El comportamiento elástico de un material ortotrópico queda caracterizado por nueve constantes independientes: 3 módulos de elasticidad longitudinal ( $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$ ), 3 módulos de elasticidad transversal ( $G_{xy}$ ,  $G_{yz}$ ,  $G_{zx}$ ) y 3 coeficientes de Poisson ( $\nu_{xy}$ ,  $\nu_{yz}$ ,  $\nu_{zx}$ ).

### 3.3 ANÁLISIS FUNCIONAL

El análisis funcional es la rama de las matemáticas que permite relacionar un sistema aplicado (dinámico) con un sistema matemático con lo cual se complementan aplicaciones de la ingeniería, en este caso con los materiales, y específicamente del análisis, que trata del estudio de los espacios conocidos por medio de funciones. Tiene sus raíces históricas en el estudio de transformaciones lineales tales como transformación de Fourier y el estudio de las ecuaciones diferenciales y ecuaciones integrales. La palabra funcional se remonta al cálculo de variaciones, implicando una función cuyo argumento es una función que se valida con los modelos matemáticos convencionales (Springer-Verlag, 2002)

En la visión moderna inicial, se considera el análisis funcional como el estudio de los espacios vectoriales normados completos sobre los reales o los complejos. Tales espacios se llaman Espacios de Banach. Un ejemplo importante es el espacio de Hilbert, donde la norma surge de un producto escalar.

Los espacios mencionados son de importancia fundamental en la formulación matemática de la mecánica y sobre todo en la mecánica cuántica. De forma general y modernamente, el análisis funcional incluye el estudio de los espacios vectoriales localmente convexos y aún topológicos.

Un objeto importante de estudio en análisis funcional son los operadores lineales continuos definidos por la matemática. Éstos conducen naturalmente a la definición del álgebra y otras álgebras de operadores, como lo es el álgebra lineal.

La importancia de utilizar las matemáticas aplicadas a este tipo de proyectos es de gran utilidad, debido a que con ello se logra la justificación para el desarrollo de un material compuesto, como se presenta en este trabajo.

Se considera que la aplicación de los materiales compuestos puede ser ampliamente elevada si se logran estandarizar sus propiedades cuantitativas y cualitativas como tal. Algunas de ellas de las más importantes a tratar son el costo y diseño del material.

El principal aspecto de diseño de materiales compuestos consiste en aprender a utilizar las propiedades que se encuentran relacionadas entre sí, y por medio de modelos matemáticos se logra fusionar la parte teórica y práctica que conlleva a desarrollar un material compuesto, que en este caso en particular se obtendrá un material de polímero - madera , para el plástico se utilizará polipropileno reciclado y para la madera el aserrín.

Una de las principales consideraciones para realizar este trabajo radica en identificar las características sobresalientes de los materiales compuestos, que en base a las investigaciones previas se encontró que son la rigidez y la resistencia específica.

La idea principal por realizar este trabajo consiste en establecer las relaciones funcionales de las variables y ecuaciones de estado que permiten complementar el diseño de materiales compuestos, considerando todas las propiedades mecánicas pertinentes de estos materiales.

En este trabajo se presentará en forma muy general el sistema matemático que da forma al desarrollo de un material compuesto, con lo cual se pretende obtener la mayor cantidad de propiedades de este material y generar su aplicación dentro de los estándares de la ingeniería, elementos matemáticos que se deben considerar para el estudio y análisis de las propiedades mecánicas de un material compuesto.

De la misma manera se puede hacer uso de la metodología de sistemas axiomáticos, a los cuales se denominan como análisis funcional para este proyecto.

Es importante hacer mención de lo que representa este tipo de diseño que en general se aplica a productos y que al final de este trabajo se muestra la relación de esta metodología con las matemáticas básicas que se establecen para la obtención del material compuesto a desarrollar.

El diseño de productos es una de las actividades que desde cualquier campo de la ingeniería contribuye a la sociedad en la satisfacción de sus necesidades que se encuentran a corto y largo plazo. Las actividades generales en el desarrollo de un diseño, constan de una etapa de identificación del problema a partir de un conjunto difuso de expresiones lingüísticas de los potenciales usuarios del producto, seguido de una etapa con elevado componente creativo, en donde el diseñador genera las alternativas posibles de solución y esto a su vez, es seguido por la etapa analítica, o de evaluación, donde a partir de la confrontación entre alternativas posibles y especificaciones definidas, se llega a una conclusión sobre cuál debería ser la mejor alternativa.

Las actividades involucradas en el desarrollo integral de un producto, requieren como etapa preliminar la definición clara del tipo de producto a diseñar, o como es en este caso para el material a desarrollar. En este sentido, en un proceso de diseño se generan alternativas, lo cual se consigue identificando los elementos más importantes del material de diseño con los puntos o en otras palabras las especificaciones más claras y sus respectivos niveles y, a partir de allí generando, mediante permutación de atributos principales sobre sus niveles, las posibles alternativas de diseño y/o desarrollo.

El diseño inicia reconociendo las necesidades de la sociedad, las cuales se formalizan, generando un conjunto de requerimientos funcionales, conocidos como FRs. La selección de FRs, que define el problema de diseño, es entregada al diseñador. Una vez la necesidad se formaliza, las ideas son generadas para crear un producto (o sistema). Este producto es analizado y comparado con las condiciones originales de FRs, a través de una retroalimentación de lazo cerrado. Cuando el producto no satisface completamente las FRs especificados, entonces debe dar lugar a la generación de una nueva idea o al cambio de los requerimientos funcionales para reflejar la necesidad original de forma más exacta. Este proceso es iterativo y continua hasta alcanzar un resultado aceptable en base a los requerimientos solicitados (Shu, N, 1990).

El diseño axiomático o análisis funcional es una metodología cuyos orígenes se remontan a los años ochenta, esta tiene como fundamento ayudar al diseñador a estructurar y entender los problemas del diseño, facilitando la síntesis y análisis de los requerimientos de diseño adecuados, las soluciones y procesos.

La meta final de esta metodología es establecer unas bases científicas para diseñar y mejorar las actividades de diseño, dotando al diseñador de una fundamentación teórica, basada en las herramientas y procesos de la lógica y el pensamiento racional.

La teoría de diseño axiomático ha sido estudiada para el diseño de productos, procesos, desarrollo de software y en empresas de servicios. Sin embargo, su estudio y aplicación hasta el momento comienza a ser estudiada en el desarrollo de productos con

actividad sobre seres vivos y las aplicaciones que satisfacen, como ya se había mencionado, las necesidades de un usuario.

El análisis funcional se fundamenta en los siguientes conceptos:

1. Existen cuatro dominios en el mundo del diseño; dominio del usuario, dominio funcional, dominio físico y dominio del proceso. Los atributos del usuario son identificados en el dominio del consumidor y son establecidas en la forma de requerimientos funcionales de un producto en el dominio funcional. Los parámetros de diseño que satisfacen los requerimientos funcionales están definidos en el dominio físico, y en el dominio del proceso, las variables de manufactura definen cómo debe producirse ese producto. El proceso de diseño en conjunto incluye el procesamiento continuo de información entre y dentro de los cuatro dominios identificados.
2. Las alternativas de solución son creadas por la descripción en detalle de los requerimientos especificados en un dominio para establecer los parámetros característicos en el dominio siguiente. La relación entre los dominios del usuario y funcional es definida como el concepto de diseño; la relación entre los dominios físico y de proceso corresponden al diseño del proceso.
3. Las restricciones, conocidas como Cs, son definidas como los valores límite, o especificaciones o fronteras que una solución de propuesta de diseño debe satisfacer. Las Cs se diferencian de los FRs, en que las Cs no tienen que ser independientes de otras Cs o FRs.
4. El proceso de mapeo o relación entre dominios, puede ser expresado matemáticamente en términos de los vectores característicos que definen el objetivo del diseño y la solución de diseño.
5. La salida de cada dominio desarrolla los conceptos de lo abstracto a información detallada en una forma jerárquica priorizada. La descomposición jerárquica es un dominio puede no ser llevada a cabo independientemente de otros dominios, así la descomposición, sigue una relación en zigzag entre dominios adyacentes.
6. La existencia de los axiomas de diseño, proveen una base racional para evaluar las alternativas de solución propuesta y la subsecuente elección de la mejor alternativa (Du, X, 2000).

En la descripción de los puntos anteriores podemos notar la gama de alternativas que pueden surgir en el momento de aplicar el análisis funcional para una aplicación determinada, además de que es muy claro cómo se debe seguir la metodología para que esta misma arroje datos específicos del diseño a considerar.

En la siguiente figura 3.1 se observa la forma de emplear el análisis funcional, como una secuencia lineal en donde no existe la retroalimentación, como en las metodologías tradicionales que se conocen hasta el momento.

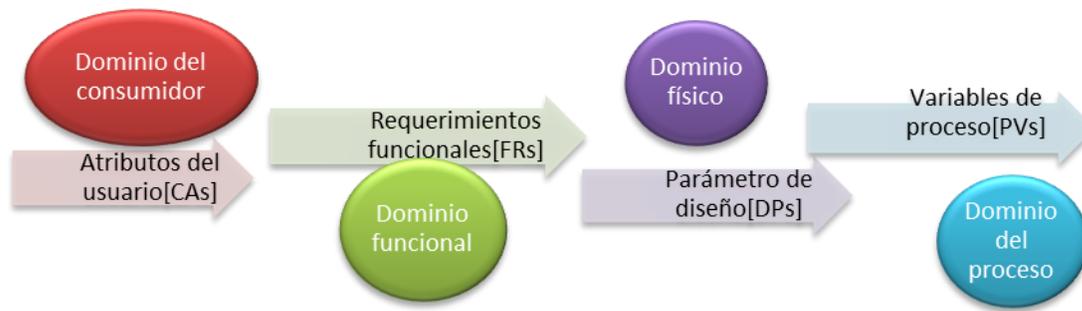


Fig.3.1 Modelo del análisis funcional

En los siguientes párrafos se observa la forma en cómo se inició el análisis matemático para la generación del material compuesto, que se encuentra basado en las matemáticas básicas de la ingeniería, que es el álgebra lineal y que posteriormente se tomaran aspectos del diseño axiomático para la evaluación del sistema generado.

A continuación se enlistan las características a considerar para llevar a cabo el análisis matemático.

1. Temperatura(T)
2. Módulo de elasticidad(E)
3. Porcentaje de material plástico en peso(P<sub>P</sub>)
4. Porcentaje de madera en peso(P<sub>M</sub>)
5. Dureza(D)
6. Resistencia última(R<sub>U</sub>)

Estos son algunos de los elementos que se evaluarán para determinar los estándares del material compuesto a desarrollar.

Lo esencial para la obtención de estos datos es realizar ensayos mecánicos de los cuales se desprenden los valores que se requieren para dicho análisis, considerando que para ello se requiere de la fabricación de probetas del material, las cuales deben ser estandarizadas para lograr datos reales.

De acuerdo a los elementos que se contemplan para el análisis matemático, se establece un sistema de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 T_1 + E_1 + P_{p1} + P_{m1} + D_1 + R_{u1} &= MC_{eff1} \\
 T_2 + E_2 + P_{p2} + P_{m2} + D_2 + R_{u2} &= MC_{eff2} \\
 T_3 + E_3 + P_{p3} + P_{m3} + D_3 + R_{u3} &= MC_{eff3} \dots\dots\dots(31) \\
 T_4 + E_4 + P_{p4} + P_{m4} + D_4 + R_{u4} &= MC_{eff4} \\
 T_5 + E_5 + P_{p5} + P_{m5} + D_5 + R_{u5} &= MC_{eff5} \\
 T_6 + E_6 + P_{p6} + P_{m6} + D_6 + R_{u6} &= MC_{eff6}
 \end{aligned}$$

En donde se puede apreciar que se encuentra muy relacionado con los fundamentos del análisis del diseño de materiales compuestos isótropos, a través de las matrices de tensión. Posteriormente, se hace uso del cálculo de eigenvalores considerando lo siguiente: Una matriz A con los coeficientes del sistema de ecuaciones anterior y la matriz identidad I, correspondiente a la dimensión del sistema ya mencionado, para lograr el siguiente desarrollo.

$$|\lambda I - A| = 0 \dots\dots\dots(32)$$

De donde se obtiene un polinomio característico, para así desarrollarlo y determinar los valores de λ, lo cual indicará datos de los parámetros identificados como los elegidos para tener un material efectivo como compuesto.

Habrá que recordar que este no es el único método por cual se pueden determinar las propiedades óptimas para un material compuesto, pero es el primer acercamiento que permite visualizar a través de las matemáticas básicas las aplicaciones para la generación de materiales de esta índole.

Y que posteriormente se verificará a nivel experimental si los valores de  $\lambda$  corresponden a la realidad y con ello comprobar la esencia del análisis matemático.

Lo realizado hasta el momento es el desarrollo matemático que permite fusionar diversas propiedades mecánicas de un material, en este caso, compuesto, que conforme se vaya avanzando en él se observarán y serán palpables los resultados del material, por lo cual el resultado propio de este trabajo radica principalmente en lograr establecer un modelo de aproximación para el diseño de un material compuesto.

Es necesario mencionar que este modelo se verificará con la teoría existente para materiales compuestos que se encuentra dentro de la literatura más reciente que se encuentre vinculada directamente con las aplicaciones de modelos matemáticos en aplicaciones de la ingeniería y sobre todo en materiales plásticos, que de acuerdo a sus características, se puede manejar de esta forma, matemática.

En la actualidad, ya se encuentran bastantes métodos de esta índole para analizar los comportamientos de los materiales compuestos y que la mayoría de ellos se obtienen a través de los métodos matriciales, hablando fundamentalmente en tensiones y los parámetros denominados ingenieriles.

Algunos de los porcentajes en peso que se pretenden evaluar para determinar la funcionalidad del modelo matemático propuesto son:

Tabla 4. Datos del porcentaje de material a utilizar para la generación del material compuesto.

<b>MATERIAL COMPUESTO</b>	
<b>Porcentaje de material plástico[%]</b>	<b>Porcentaje de madera[%]</b>
100	0
90	10
80	20
70	30
60	40

Con estos datos se han obtenido piezas para la respectiva evaluación experimental y a su vez generar las especificaciones matemáticas, que son el resultado de la experimentación, que se muestra en los siguientes párrafos.

## **CAPITULO 4. PREPARACIÓN Y DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL**

A continuación se describe la forma en la cual se lleva a cabo la preparación de las probetas de material compuesto, en conjunto con la descripción de la parte experimental desarrollada para este material

### **4.1 MATERIALES EMPLEADOS**

#### **MATERIAL RECICLADO DE MADERA**

En este apartado se hace mención de la forma en cómo se realiza la separación del material reciclado de la madera, aserrín, el cual consistió en utilizar nuevamente un cribador con seis tipos diferentes de malla, de acuerdo a la norma NMX- B -231- 1990, de donde se obtuvo la siguiente tabla 5 para identificar las mallas.

Tabla 5. Clasificación de mallas para el cribado

<b>Malla</b>	<b>Número</b>
<b>1</b>	12
<b>2</b>	14
<b>3</b>	16
<b>4</b>	20
<b>5</b>	30
<b>6</b>	40

Tabla en donde se dan los datos obtenidos correspondientes al número de malla a utilizar en la separación del aserrín, para su aplicación al material compuesto. En donde los números corresponden a la cantidad de aberturas o espacios existentes por pulgada lineal que tiene la malla, por ejemplo la malla número 4 tiene 20 espacios por pulgada, la número 6, 40 espacios por pulgada.

El proceso de cribado del aserrín se muestra con la secuencia de la figura 4.1.

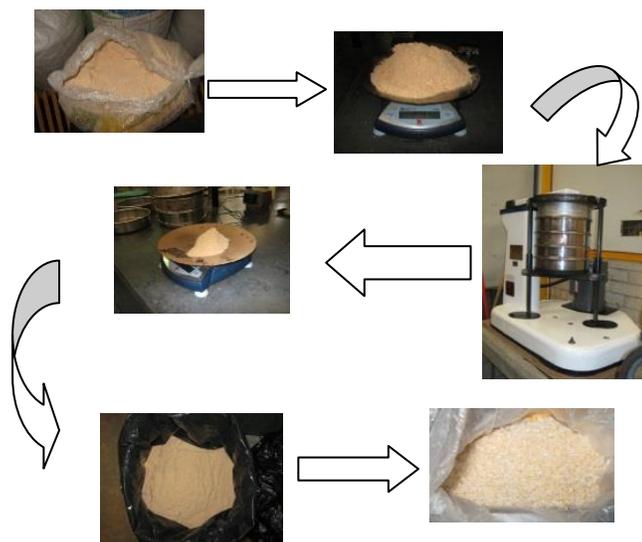


Fig. 4.1. Proceso del cribado en el aserrín de pino

La figura 4.1 esquematiza la secuencia paso a paso de la forma en cómo se llega a la obtención del aserrín para ser utilizado en el desarrollo del material compuesto de acuerdo a la geometría relacionada con el tamaño obtenido por el cribado.

De la separación se obtuvieron los siguientes tipos de aserrín que se muestran en la figura 4.2, para cada una de las cribas.



Malla 12



Malla 14



Malla 16



Malla 20



Malla 30



Malla 40

Fig. 4.2. Tipos de aserrín obtenidos por las diferentes cribas utilizadas.

En la figura 4.2 mostrada se aprecia la forma del aserrín desde la primera etapa del cribado hasta la última con la criba de malla 40 y la cual se convirtió a una fibra muy delgada en sus dimensiones, antes de llegar a polvo.

El objetivo de este proceso de clasificación es poder tener un mayor control para la combinación del material compuesto, factor que se ha señalado como importante en la revisión bibliográfica, para efectos de las propiedades del material compuesto elaborado.

El material se observó en un macroscopio Wild Heerbrugg modelo M400, que se aprecia en la figura 4.3.



Fig. 4.3. Macroscopio

La intención de esta observación microscópica es apreciar, en una primera vista, la morfología del aserrín para, más adelante, relacionarla con otros resultados y propiedades. Los aumentos que se consideran para el análisis visual del aserrín en el macroscópico son de 9X, dicho aumento permite establecer de forma clara la geometría que se ha de considerar para la aplicación del aserrín como refuerzo del material plástico.

Para la observación del tamaño y geometría del aserrín se consideró al material ya separado de acuerdo a las cribas mencionadas en la tabla 5. En primer lugar, se toman diversas muestras del aserrín con las mallas establecidas y se colocan sobre una superficie plana para ser observadas por medio del macroscopio.

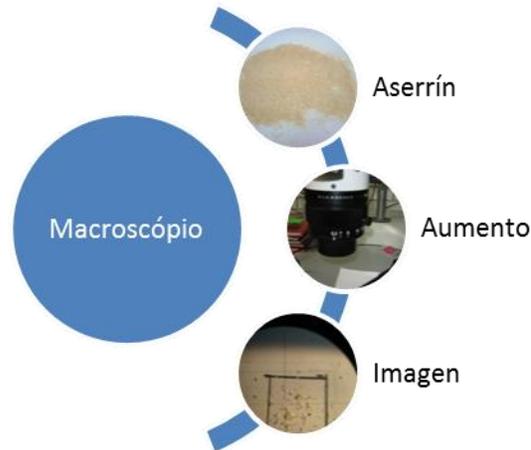


Fig. 4.4. Método para la observación en macroscopio

Se realizaron 15 observaciones para cada muestra, contemplando a las muestras de acuerdo al número de criba.

#### **MATERIAL RECICLADO DE POLIPROPILENO.**

Una etapa de gran importancia para el desarrollo de este proyecto consiste en contar con el material indicado para el desarrollo de la materia prima para conformar el producto final.

Un aspecto importante de este proyecto es considerar que el material plástico a utilizar es polipropileno reciclado, el cual tiene características importantes a considerar:

- Geometría no homogénea
- Cantidad de veces triturado
- Color del material
- Combinación de colores

Los cuatro aspectos antes mencionados se tienen que considerar para la aplicación que se le dará en la generación del compuesto, ya que ello se verá reflejado en los resultados de la evaluación de los ensayos mecánicos.

Las propiedades mecánicas que se evaluaron por medio de ensayos mecánicos y los datos de referencia para este plástico se mencionan a continuación:

Módulo de elasticidad 1.13 GPa  
 Resistencia a la tracción 29.43 MPa  
 Impacto 16 kJ/m<sup>2</sup>  
 Dureza 74 Shore D  
 Índice de fluidez 18

Estos son los parámetros con los cuales se inicia el estudio del material compuesto ya que se busca que los resultados de la evaluación mecánica del material generado se encuentren cercanos a estos datos, considerando que el material de uso será

exclusivamente de postconsumo o de los productos que no aprueban los procesos de calidad. El material base a utilizar es el polipropileno.

## 4.2 PREPARACIÓN DE PROBETAS

Para la fabricación del molde, el cual tiene la característica de fabricarse de acuerdo a las especificaciones de las probetas estandarizadas para los ensayos de tracción, impacto y dureza del material compuesto a desarrollar, se empleó un programa, que se generó para este caso, a través de un proceso de CAD para dibujar la pieza y posteriormente introducir la información de esta pieza en una máquina fresadora de control numérico, con las características que a continuación se mencionan y así obtener el molde requerido para la obtención de probetas.

### Descripción del equipo de control numérico

Año 1995

Recorrido longitudinal	510 mm (20.1 in)
Recorrido transversal Y	510 mm (20.1 in)
Recorrido vertical Z	510 mm (20.1 in)
CNC	Fanuc
Longitud de la mesa	700 mm (27.6 in)
Ancho de la mesa	520 mm (20.5 in)
Numero de herramientas	21
Cono del husillo	BT 40
Velocidad máx del husillo	6000 rpm
Potencia del motor del husillo	7.5 kW

Para la fabricación del molde se tomaron en cuenta las normas para tener las probetas en su forma estandarizada y poder obtener piezas que satisfacen los parámetros de calidad y con ello alcanzar datos experimentales más precisos.

El material utilizado para los moldes es el H13 o L6, cuyas características se mencionan a continuación; El acero H13 provee un buen balance de tenacidad, alta resistencia a la formación de grietas causadas por el choque térmico y resistencia al revenido, junto con resistencia al desgaste moderada. De temple al aire, es utilizado en la mayoría de las aplicaciones a durezas de 44-52 HRC. Las temperaturas nominales de revenido del acero H13 son bastante altas >540°C, lo cual permite que mantenga su dureza de temple y su resistencia al ser utilizado a temperaturas elevadas. Las herramientas fabricadas con el acero H13 pueden ser usadas a temperaturas de hasta aprox. 540°C (1000°F) con exposiciones breves de hasta 595°C (1100°F), siendo ideal para dados de forja, herramental para extruido en caliente y moldes de fundición a presión.

Los recursos que se utilizan son programa de CAD para dibujar la pieza y posteriormente introducir la información de esta pieza en una máquina de control numérico, figura 4.5, y así obtener el molde, considerando que se debe rectificar para tener un mejor acabado del molde.



Fig. 4.5. Máquina de control numérico (fresadora)

En la figura 4.5 se observa el equipo utilizado para realizar el proceso de fresado y barrenado en cada una de las placas utilizadas para la elaboración de los moldes con los que se fabricarán las probetas del material compuesto a utilizar en los ensayos mecánicos.

A continuación se muestra la figura 4.6 de los moldes fabricados.



Fig. 4.6. Molde fabricado para las probetas de ensayos mecánicos

#### 4.2.1. MODELOS DE CAD Y SIMULACIÓN DE LAS PROBETAS PARA ENSAYOS MECÁNICOS

Una de las actividades consecuente con la investigación anterior es el realizar los modelos de CAD de las probetas para los ensayos mecánicos que se llevaron a cabo para el material compuesto, lo cual sirvió posteriormente para la generación de los moldes para la respectiva fabricación de las piezas a inyectar.

La figura 4.7 muestra las probetas que se diseñaron y posteriormente se elaboraron para determinar las características mecánicas ya mencionadas.

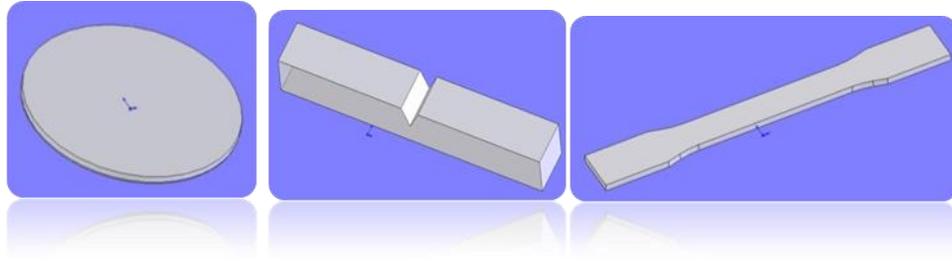


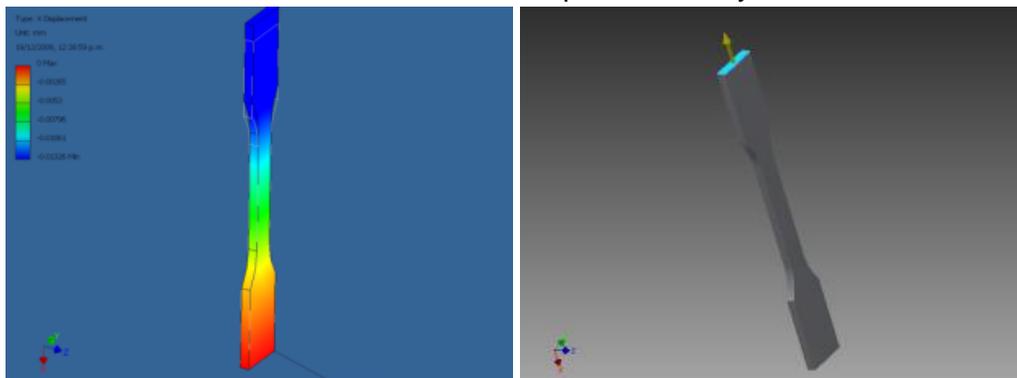
Fig. 4.7. Probetas de dureza, impacto tracción en modelo de CAD.

Los modelos de CAD se realizan con el software Solid Works, el cual permite dibujar y diseñar desde un punto de vista paramétrico. Ello significa que los parámetros de control se pueden modificar sin inconveniente alguno posterior a la realización de piezas en el programa. Una de las características que ofrece el software es el módulo de FEM (Método de Elemento Finito), ya que favorece el análisis de las piezas o probetas a ensayar y el cual da resultados cualitativos de los materiales cuando se someten a ciertas cargas o fuerzas.

Las piezas elaboradas en el CAD se realizaron de acuerdo a la norma ASTM D638M-91, que permite contemplar las medidas mínimas y máximas de las probetas, considerando los parámetros de control como lo es la tolerancia geométrica y las tolerancias de contracción para las piezas de material plástico, para este caso de estudio la contracción de entre 1.7 y 2.2% para el polipropileno respectivamente.

Una ventaja más que ofrece el programa es la facilidad para convertir el archivo a extensión stl, la cual se utiliza para simular las piezas cuando se someten a procesos de transformación, en este caso para la inyección de plásticos y el módulo que se utilizó para evaluar el proceso de inyección es Moldflow, que de igual forma está vinculado directamente con Solid Works.

A continuación se realiza un ensayo a tracción virtual por medio del simulador de elemento finito, el cual permite dar una idea tentativa y cuantificable de lo que le sucede al material cuando se somete a tensión en una máquina de ensayos universales.



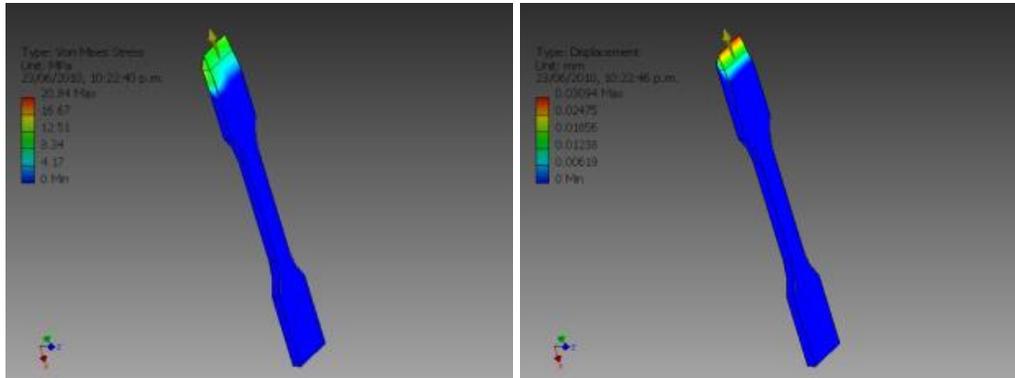


Fig. 4.8. Simulación por medio de FEM para la pieza sometida a tracción

Al realizar el proceso de tracción en un simulador virtual se obtienen datos representativos que posteriormente se comparan con los resultados de la experimentación en las probetas a elaborar para este tipo de ensayo.

Tabla 6. Resultados del ensayo de tracción virtual

Name	Minimum	Maximum
Volume	9211.01 mm <sup>3</sup>	
Mass	0.0117901 kg	
Von Mises Stress	0.0000003679 MPa	20.8429 Mpa
1 <sup>st</sup> Principal Stress	-0.401047 Mpa	16.2519 Mpa
3rd Principal Stress	-13.7834 Mpa	0.509341 Mpa
Displacement	0 mm	0.0309385 mm
Safety Factor	0 ul	0 ul

En la tabla 6 se observan los resultados de aplicar una carga a una probeta, la estimación de los esfuerzos máximos que soporta la probeta y el desplazamiento que sufre éste después de la aplicación correspondiente de la carga, recordando que son resultados que ofrece un simulador, que propone un indicio para manipular, controlar y caracterizar las probetas.

Po otro lado, en la figura 4.8 se observa la forma en cómo se puede realizar un ensayo de tracción auxiliándose de software con módulo de FEM, el cual da un panorama cuantitativo y cualitativo del comportamiento del ensayo de tracción hacia un material de plástico, como se aprecia en la figura 4.8 existen diferentes zonas identificadas por colores; rojo, amarillo, verde azul cielo y azul marino. En donde los colores tienen un significado, que se especifica en seguida:

- Zona roja: el material tiene la probabilidad mayor de fracturarse
- Zona amarilla: el material tiene una alta concentración de esfuerzos
- Zona verde: es una zona de confort en donde el material no sufre daños representativos
- Zona azul: el material se encuentra fuera de alguna falla provocada por el proceso.

En los siguientes párrafos se explica la forma de utilizar o aprovechar software para simulaciones en el proceso de transformación de plásticos, inyección, el cual es el proceso utilizado para la elaboración de las probetas del material compuesto

### **SIMULACIÓN PARA LA INYECCIÓN DE PROBETAS**

El proceso por el cual se elaboran las probetas para ser sometidas a los ensayos de tracción, impacto y dureza es el de inyección de plásticos el cual permite obtener piezas de tolerancias dimensionales controladas para su utilización del material para una función determinada o para lo requerido en este proyecto que es apoyo para la obtención de piezas que fungen como probetas de ensayos experimentales. Por ello se hace uso de un apoyo virtual para contemplar cuales son los parámetros que se controlan en el proceso de transformación de los materiales plásticos, inyección, y dicho programa o módulo se llama Moldflow, el cual se describe como un proceso dentro del análisis reológico del material a ensayar.

Los parámetros que se visualiza o que se pretender controlar, posterior a la simulación son: a) Seguridad de llenado, b) Calidad de la pieza, c) Localización del punto de inyección, d) Tiempo de inyección, e) Presión de inyección, f) Caída de presión, g) Temperatura del frente de flujo, h) Calidad de refrigeración, i) Variación de temperatura en la superficie, j) Variación del tiempo de solidificación, k) Rechupes estimados, l) Rechupes sombreados, m) Posición de atrape de gases, n) Posición de las líneas de unión.

En la figura 4.9 se observan algunas pruebas realizadas a probetas de tracción, impacto y dureza.

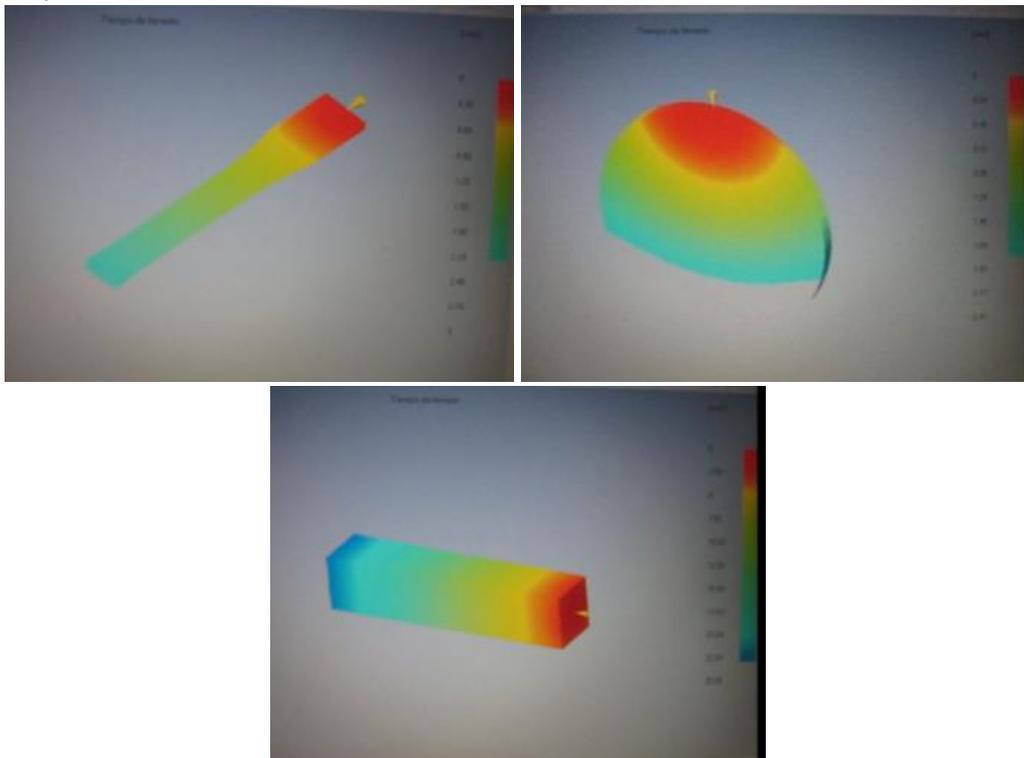


Fig. 4.9. Probeta de tracción, dureza e impacto durante el proceso de inyección en el simulador Moldflow.

#### 4.2.2. OBTENCIÓN DE PROBETAS PARA EL ENSAYO DE TENSIÓN.

Al obtener las probetas se consideraron diferentes composiciones en conjunto con el aserrín para la experimentación. Las composiciones, que se encuentran en función del volumen, se desarrollan de acuerdo a la tabla 7 que se muestra a continuación:

Tabla 7. Composición del material compuesto a generar

Plástico (PP) [%]	Madera (Aserrín) [%]
90	10
80	20
70	30
60	40

Con todas estas mezclas se obtuvieron través de un proceso de inyección de plásticos, con una máquina Vulcano, de 45 gramos de capacidad. La probeta estandarizada para el ensayo de tracción, cuya área a utilizar en el ensayo es de 600 mm<sup>2</sup>, la probeta se elaboró bajo la norma ASTM D638M-91. Estas probetas se obtienen directamente del proceso de inyección.

Aquí se muestra la figura 4.10 con el resultado de las piezas inyectadas de material plástico (polipropileno) y madera (aserrín).



Fig. 4.10. Probeta fabricada con polipropileno reciclado y aserrín

Las imágenes anteriores son probetas fabricadas por medio del proceso de inyección de plásticos, en donde se tiene dos tipos de probetas, la imagen de la izquierda corresponde a 80% de polipropileno de taparoscas de envases, 20% de aserrín en malla 40 y la imagen de la derecha muestra piezas de 80% polipropileno de envases que no pasan el control de calidad y 20 % de aserrín malla 40. Lo que distingue a estas probetas solo es el color de éstas y ello es debido al material plástico utilizado.



Fig. 4.11. Probeta 80% polipropileno y 20% aserrín

En la figura 4.11 se tiene una pieza (probeta) para el ensayo de tracción que tiene las dimensiones establecidas de acuerdo a normas ASTM, lo cual se verifico con los elementos de medición correspondientes para la validación dimensional y con ello generar las piezas para el ensayo de tracción que se aplicaron a estas piezas.

#### 4.2.3. OBTENCIÓN DE LAS PROBETAS DE IMPACTO.

En la elaboración de las probetas de impacto, se elaboran 50 piezas para cada una de las composiciones obtenidas para el material compuesto, lo cual lleva a que se elaboran 200 probetas para el ensayo correspondiente a impacto del material compuesto. En la siguiente tabla 8 se describen las composiciones en conjunto con la malla de cribado y la cantidad de probetas elaboradas,

Tabla 8. Descripción de las probetas para impacto

Plástico [%]	Aserrín [%]	Malla [número]	Cantidad [pzas]
90	10	40	50
80	20	40	50
70	30	40	50
60	40	40	50



Fig. 4.12. Probetas elaboradas para el ensayo de impacto

En la figura 4.12 se aprecian las diferentes probetas elaboradas para los ensayos de impacto correspondientes, se observa que existen probetas de material virgen, y de las diversas composiciones propuestas en la tabla número 8.

#### 4.2.4. OBTENCIÓN DE LAS PROBETAS DE DUREZA.

Para las probetas de dureza, se realizaron una cantidad de estas mismas en base a norma, de las cuales se muestra la tabla 9 de la cantidad de piezas producidas.

Tabla 9. Probetas fabricadas para el ensayo de dureza

Probetas, composición	Malla	Cantidad
60%-40% A	20	100
60%-40% A	30	100
60%-40% A	40	100

Al igual que en el caso de las probetas para el ensayo de impacto, se realizó el ensayo a una cantidad determinada de acuerdo a la norma NMX-Z-12.

En la figura 4.13 se muestran las probetas y el molde empleado para la fabricación de las piezas para los ensayos de dureza.



Fig. 4.13. Probetas elaboradas para el ensayo de dureza en el material compuesto.

Las normas utilizadas para obtener las medidas estándar de las probetas para ensayos mecánicos son:

- ASTM-D638M-91 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.
- ASTM-D695M-91 Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics.
- ASTM-D256 Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics.
- ASTM-D671-90 Standard Test Methods for Flexural Fatigue of Plastics by Constant-Amplitude-of-Force.
- ASTM-D2240 Standard Test Method for Rubber Property- Durometer Harness.

### 4.3 TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN EMPLEADAS

Los procesos para caracterizar materiales compuestos se realizan a través de la evaluación de las propiedades de los materiales, las cuales se clasifican de acuerdo a la siguiente enumeración:

1. Físicas (eléctricas, mecánicas, térmicas, ópticas)
2. Químicas (oxidación)
3. Ecológicas (reciclables, tóxicos, biodegradables, renovables)

#### Propiedades Mecánicas.

En lo relacionado a las propiedades mecánicas, estas son de las más importantes, ya que describen el comportamiento de los materiales cuando son sometidos a las acciones de fuerzas exteriores. Una propiedad muy general de este tipo es la resistencia mecánica, que es la resistencia que presenta un material ante fuerzas externas. Algunas más concretas son: a) elasticidad, propiedad de los materiales de recuperar su forma original cuando deja de actuar sobre ellos la fuerza que los deforma. Una material muy elástico, después de hacer una fuerza sobre él y deformarlo, al retirar la fuerza vuelve a su forma

original. Otra propiedad es la plasticidad, b) plasticidad, propiedad de los cuerpos para adquirir deformaciones permanentes, c) maleabilidad, facilidad de un material para extenderse en láminas o planchas, d) ductilidad, propiedad de un material para extenderse formando cables o hilos, e) dureza, es la resistencia que opone un material a dejarse rayar por otro. El más duro es el diamante, que solo se puede rayar con otro diamante. Para medir la dureza de un material se utilizan diversas escalas, f) tenacidad, es la resistencia que ofrece un material a romperse cuando es golpeado o la energía requerida para fracturar (romper) un material, g) fragilidad, es la propiedad que tienen los cuerpos de romperse fácilmente cuando son golpeados. El metal es tenaz y el vidrio es frágil y duro.

Propiedades ecológicas.

Según el impacto que producen los materiales en el medio ambiente, se clasifican en: a) reciclables, son aquellos materiales que se pueden reciclar, es decir, el material puede ser usado para fabricar otro diferente, b) reutilizable, se puede volver a utilizar pero para el mismo uso, c) tóxicos, estos materiales son nocivos para el medio ambiente, ya que pueden resultar venenosos para los seres vivos y contaminen el agua, el suelo o la atmósfera, d) biodegradables, son los materiales que la naturaleza tarda poco tiempo en descomponerlos de forma natural en otras sustancias.

Después de la descripción de las propiedades de los materiales se observa de forma clara que las características de los materiales compuestos de este tipo polímero - madera, radica principalmente en el análisis de las propiedades mecánicas. Las que se emplearon son:

- A. Ensayo de tracción
- B. Ensayo de impacto
- C. Ensayo de dureza

Ensayo de tracción.

Este ensayo en ingeniería es ampliamente utilizado, pues suministra información sobre la resistencia y ductilidad de los materiales utilizados en el diseño y también para la verificación de especificaciones de aceptación. Todos los materiales tienen una combinación de comportamiento elástico y plástico en mayor o menor proporción, por lo cual se aplica dentro del comportamiento de los materiales compuestos

Ensayo de impacto.

El ensayo de impacto genera datos útiles cuantitativos en cuanto a la tenacidad del material. Sin embargo, no proporciona datos adecuados para el diseño de secciones de materiales que contengan grietas o defectos. Este tipo de datos se obtienen desde la disciplina de la mecánica de la fractura, en la cual se realizan estudios teóricos y experimentales de la fractura de materiales estructurales que contienen grietas o defectos preexistentes.

### Ensayo de dureza.

La dureza de un material es la resistencia que opone a la penetración de un cuerpo más duro. La resistencia se determina introduciendo un cuerpo de forma esférica, cónica o piramidal, por el efecto que produce una fuerza determinada, durante cierto tiempo, en el cuerpo a ensayar. Como indicador de dureza se emplea la deformación permanente, plástica. Para ciertas necesidades específicas existen alternativas de microdureza e incluso de nanodureza.

Por medio de estos ensayos será posible establecer parámetros de control y de observación para el material compuesto en donde se pondrán en la mesa la ductilidad, dureza, tenacidad y fragilidad del material desarrollado para evaluar la posibilidad de aplicarse en productos especialmente los ligados a su aplicación en sectores rurales.

## **5. PRESENTACION, DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

---

En este capítulo se tienen los elementos necesarios para la caracterización y evaluación correspondiente al material compuesto, lo cual ofrece una serie de resultados que a su vez se analizan de manera puntual para el desarrollo del material compuesto de plástico con madera.

### **5.1 DEFINICIÓN DE LA CARACTERIZACIÓN**

La caracterización de un material compuesto radica primordialmente, para este caso de estudio, en evaluar las propiedades mecánicas que se aplican al estudio de los materiales, considerando que la caracterización permite generar la evaluación del material que se desarrolló como un compuesto de plástico con madera.

Y las caracterizaciones a realizar para este material compuesto de productos reciclados está compuesta por:

- 1) Caracterización mecánica
- 2) Caracterización microestructural

La primera consiste en obtener los resultados e interpretación de los ensayos de tracción, impacto y dureza. Para la caracterización microestructural se remite al uso de microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido.

### **5.2 ENSAYOS MECÁNICOS**

#### **Ensayo de tracción.**

Uno de los ensayos mecánicos más comunes es el realizado a tracción. El ensayo de tracción se emplea para determinar diversas propiedades de los materiales para ser considerados como parámetros de diseño. Normalmente, una probeta se deforma hasta la rotura con una carga de tracción que aumenta en forma gradual y que se aplica

uniacialmente a lo largo del eje mayor de la probeta. Por lo general se utilizan secciones de probetas circulares, sin embargo también las hay de forma rectangular y el ensayo dura varios minutos y es destructivo: la probeta del ensayo se deforma de manera permanente y a menudo se fractura.

Para la realización del ensayo de tracción se elaboraron las siguientes probetas en sus diferentes composiciones.

Tabla 10. Probetas fabricadas para el ensayo de tracción

Compuesto	Malla	Cantidad
PP90-A10	40	30
PP90-A10	30	30
PP80-A20	40	30
PP80-A20	30	30
PP70-A30	40	30
PP70-A30	30	30
PP60-A40	40	30
PP60-A40	30	30
Polipropileno reciclado, color		Cantidad (pzas)
Rojo		50
Plateado		50
Negro		50



Fig.5.1. Muestras de las probetas para el ensayo de tracción de los materiales compuesto PP-A reciclados.

En la figura 5.1 se observan bolsas con las combinaciones de material compuesto previamente elaboradas con la materia prima descrita anteriormente, para la fabricación de probetas en el ensayo de tracción. El ensayo se realizó a través de la siguiente secuencia.

Los pasos a seguir para el ensayo los que se visualizan en la figura 5.2 y se describen como:

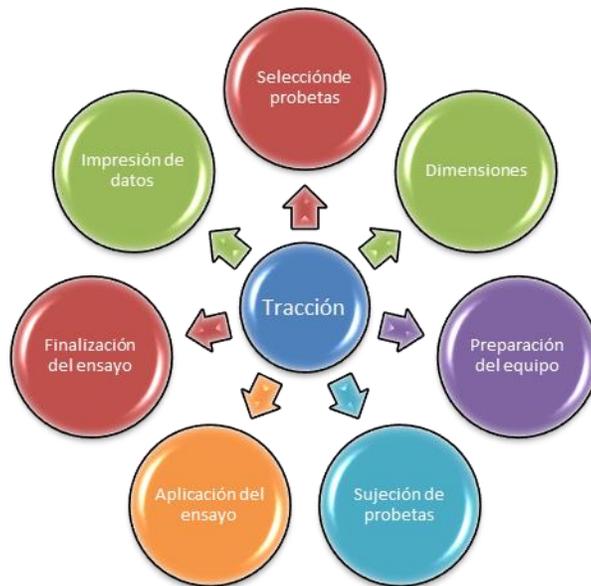


Fig. 5.2. Pasos a seguir para el ensayo de tracción

- Selección de las probetas: de manera visual se eligen aquellas piezas que no tienen defecto alguno como lo son rechupes, imperfecciones, exceso de material, etc.
- Obtención de las dimensiones de la probeta: las dimensiones requeridas se validan y que deben ser 150 mm de largo<sub>1</sub>, 60 mm largo<sub>2</sub>, 20 mm ancho<sub>1</sub>, 10 mm ancho<sub>2</sub>, 4 mm de espesor.
- Preparación del equipo de tracción (Máquina Universal de Ensayos Mecánicos): para la preparación del equipo se emplea una computadora en donde se colocan los datos necesarios para llevar a cabo el ensayo correspondiente, que ya se encuentra cargado en el sistema del equipo.
- Sujeción de las probetas en la máquina: se realiza la sujeción de las probetas de tal manera que al momento de aplicar la carga a la pieza, la fuerza ejercida se aplique de manera adecuada con respecto al sistema de referencia colocado en el sistema.
- Aplicación del ensayo: Se inicia la carga hacia la probeta y en ella se observa una pequeña deformación antes de fracturarse. En el momento que se fractura la probeta se detiene el equipo y se extrae la pieza, se llevan a cabo las mediciones de las nuevas dimensiones del material.
- Finalización del ensayo: se termina el ensayo en el momento que se ha detectado la fractura en la pieza y se prosigue a recabar los datos de las medidas finales y obtener las fotografías correspondientes de las probetas en el lugar donde se ubica la fractura.

Los parámetros que se controlan y los más importantes para el desarrollo del ensayo se mencionan de la siguiente manera.

- a) Velocidad de carga
- b) Desplazamiento máximo
- c) Carga máxima
- d) Sistema de referencia
- e) Método de ensayo

### Ensayo de impacto

Para medir la energía de impacto, algunas veces también llamada tenacidad a la entalla, se diseñaron dos ensayos que ya se encuentran estandarizados (Norma ASTM Standard E 23, "Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials", los ensayos de Charpy y de Izod. La técnica de Charpy con entalla en forma de V (CVN) es la de uso más común. En los dos ensayos, la probeta tiene la forma de una barra de sección transversal cuadrada, en la que se maquina una entalla en forma de V.

En esta sección se realizaron unas muestras más de probetas para el ensayo de impacto con diversos tamaños de malla para generar datos comparativos con tres tipos de mallas y las composiciones correspondientes, las cuales se mencionan en la siguiente tabla 11.

Tabla 11. Composición de aserrín y cantidad de probetas elaboradas

Número	Malla	Composición de aserrín [%]	Piezas fabricadas
1	20	10-40	50
2	30	10-40	50
3	40	10-40	50

En la tabla 11 se muestran datos que permiten establecer que las piezas ensayadas dan resultados acertados de acuerdo a estándares en la evaluación de pruebas o ensayos a productos terminados, de acuerdo a la norma NMX-Z-12, el tamaño de la muestra es el que se menciona en la siguiente tabla.

Tabla 12. Tamaño de las muestras a ensayar

Malla	Tamaño de muestra[pzas]
20	57.6---58
30	57.6---58
40	38.4---39

Para el ensayo de impacto, la figura 5.3, muestra la secuencia seguida para su realización:



Fig. 5.3. Secuencia de etapas para el ensayo de impacto



Fig. 5.4. Equipo de impacto, probetas para el ensayo

En la figura 5.4 se logra observar el tipo de probetas que se generaron para el ensayo de impacto, el cual se desarrolló de acuerdo a normas ASTM establecidas para la aplicación del ensayo en las piezas de material compuesto de polipropileno y aserrín de la madera de pino.

### Ensayo de dureza

Una de las propiedades que es importante a considerar es la dureza. Los ensayos de dureza se realizan con mucha mayor frecuencia que cualquier otro ensayo mecánico por

diversas razones, las cuales se mencionan a continuación: 1) son sencillos y baratos; por lo general no es necesario preparar una probeta especial y la máquina de ensayos es relativamente de bajo costo, 2) el ensayo no es destructivo, la probeta no se fractura ni se deforma excesivamente; la única deformación es una pequeña huella, 3) a partir de los resultados de dureza, se pueden estimar otras propiedades mecánicas como la resistencia a la tracción.

Para la realización del ensayo de dureza se consideraron probetas cuya composición se encuentra desde el 10 % al 40% de aserrín en las mallas 20, 30 y 40, que son las más recomendables hasta el momento para el desarrollo de este material y ello debido a que presentan mejor característica para ser procesados y obtener el material para la fabricación de las probetas finales.

El ensayo de dureza representa que tanto soporta el material a la penetración de un indentador, para este caso en particular se hace uso de un durómetro Shore D, exclusivamente para materiales plásticos denominados duros, como lo es el acetal, polipropileno, pvc, entre otros.

En la figura 5.5 se muestra el durómetro utilizado y probetas ya ensayadas.

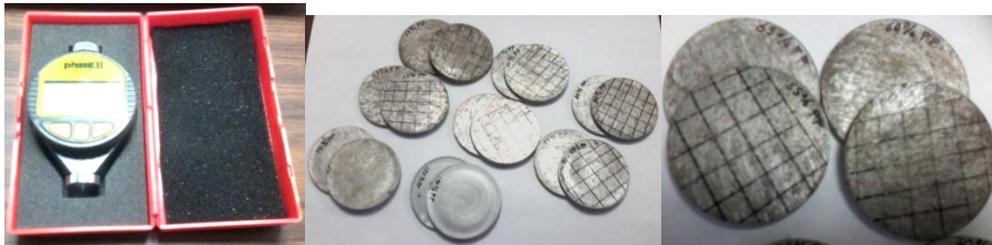


Fig. 5.5. Durómetro Shore D y probetas estandarizadas.

En estas figuras se aprecia que en las probetas se realizó un mallado en ellas, el cual se considera de esa forma para llevar a cabo el ensayo, ya que la teoría menciona que entre huella de penetración en los ensayos de dureza debe existir una distancia mínima de 5 veces la indentación.

La forma en cómo se llevó a cabo el ensayo se describe por medio de la figura 5.6.

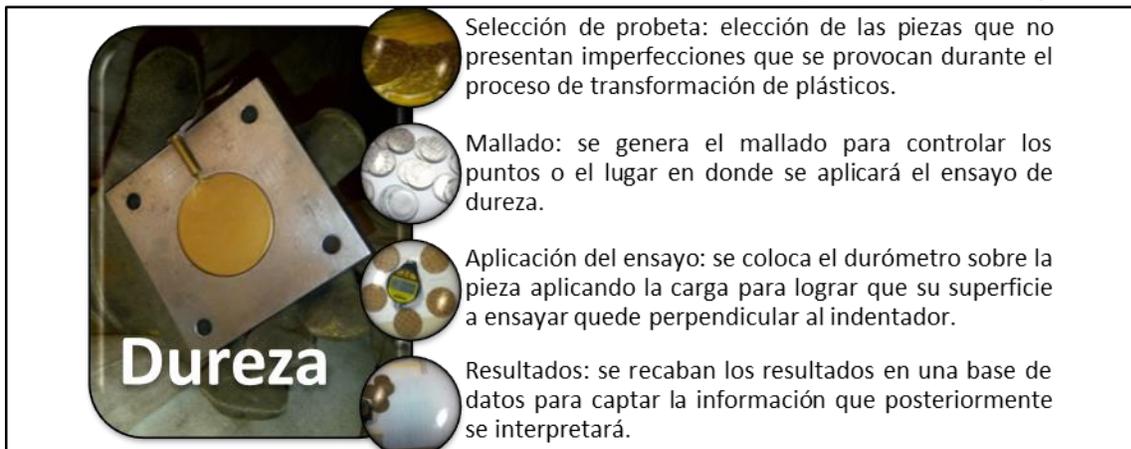


Fig. 5.6. Proceso para la medición de dureza en el material compuesto

Los resultados de este apartado se describen y mencionan en la sección de análisis de resultados en donde se menciona la importancia que tiene el desarrollo adecuado de cada uno de los ensayos mecánicos que se están describiendo en esta sección.

### Microscopía

Muy a menudo se desea observar las características de un material y ello se puede realizar por medio de la técnica de microscopía, en donde se observa la estructura de un material y se determinan tamaños de grano, defectos grandes en un material, fracturas. Sin embargo, dichas características de interés son demasiado pequeñas para observarlas de forma directa, por ello el uso de un microscopio hace de esta una actividad valiosa a aplicar en el desarrollo del material compuesto.

Existen diferentes tipos de microscopios ópticos y se clasifican por su fuente de luz. Los microscopios más comunes, se reitera, son los ópticos, si el material es opaco, solo una superficie se puede examinar microscópicamente, y la luz reflejada que pasa a través de la lente debe revelar la imagen. Para la mayoría de los materiales la superficie debe ser pulida antes de que cualquier característica significativa sea revelada, muchos materiales requieren un tratamiento de la superficie mediante un agente grabador para revelar la información. La reactividad entre los agentes grabadores y algunos materiales varía dependiendo de la orientación de los granos. Y a continuación se describen las dos formas de microscopía utilizadas para la evaluación del material desde el punto de vista estructural.

*Microscopía óptica:* esta ofrece diversas ventajas, es equipo es barato y fácil de operar, las características grandes como los granos y las fracturas son frecuentemente visibles. El software comercial puede calcular el tamaño de cada grano visible, sin embargo, los microscopios ópticos se limitan a una ampliación de alrededor de 2000x, y muchas de las características que regulan el comportamiento se encuentran en una escala mucho más pequeña. Cuando la microscopía óptica no es suficiente, los investigadores optan por la microscopía de electrones, un haz de electrones de alta energía enfocado sirve como la fuente para la imagen, la longitud de onda efectiva de un haz de electrones es de 0.003 mm, permitiendo la resolución de detalles más finos. Están disponibles dos clases de microscopios de electrones (de barrido y de transmisión), que proporcionan diferente información, de los cuales el que se describe a continuación se utilizó para obtener fotografías del material compuesto para la superficie y la fractura de dicho material.

Lo que se realiza es obtener información sobresaliente en lo relacionado a la microestructura del material compuesto plástico madera (PP-Madera).

Un objetivo más de este estudio es el de evaluar el comportamiento de los materiales compuestos de plástico-madera, en función de las proporciones en peso de los componentes y los efectos de la granulometría del material de refuerzo, como parte fundamental que permita evaluar las posibilidades de su aplicación.

Esta etapa se desarrolla a través de la observación con un microscopio óptico lo cual permite visualizar como se encuentra en este caso el aserrín incorporado al plástico, lo cual se realizó con un microscopio óptico marca NIKON modelo EPIPHOT, en el cual se

utilizaron cuatro diferentes aumentos para la obtención de las fotografías correspondientes

- Llevar a cabo ensayos que permitan determinar algunas propiedades mecánicas del material compuesto.
- Observar en un microscopio óptico el comportamiento de las fibras de la madera en el material.
- Obtención de fotografías de la estructura de estos materiales compuestos.

En la figura 5.7 se muestra el microscopio óptico utilizado en la obtención de imágenes para las piezas de material compuesto.



Fig. 5.7. Microscopio Óptico Nikon

*Microscopía electrónica de barrido:* en ésta se unen y se emplean electrones retrodispersados, dirigidos sobre un área específica. La resolución de los detalles al nivel de submicras es posible con este tipo de microscopio, y la mayoría de los sistemas son capaces de capturar la imagen de forma digital para impresión y análisis. Las características de las superficies son directamente visibles, lo cual hace a este microscopio ideal para evaluar fenómenos superficiales



Fig. 5.8. Microscopio electrónico de Barrido XL20

El microscopio electrónico de barrido marca Philips modelo XL20 TMP, está diseñado específicamente para reducir la complejidad de su operación sin perder las características esenciales y básicas del microscopio de barrido. Es totalmente controlado por computadora mediante un software con interfase gráfica.

La potencia del sistema del microscopio incluye magnificaciones entre 10 y 100.000 aumentos con una excepcional profundidad de campo. La visión de la muestra se efectúa en un monitor de pantalla plana de cristal líquido de 17 pulgadas.

El portamuestras presenta las siguientes características:

- Distancia libre de trabajo: 3 mm hasta 75 mm
- Inclinación de la platina:  $-15^{\circ}$  a  $+75^{\circ}$
- Rotación: Continua.
- Traslación: Z=60 mm; X=50 mm; Y=50 mm
- Número de tacos: 7 al mismo tiempo reduciendo el tiempo de intercambio de cada muestra.

El tiempo de vacío entre cada apertura es de alrededor de 5 minutos dependiendo del tiempo de uso previo y del tipo de muestra. El diámetro de la platina y la altura del detector de electrones permiten la observación en detalle de muestras de 50 mm de diámetro por 30 mm de altura. El software de análisis instalado en la computadora que opera el microscopio permite una serie de utilidades incluyendo mediciones dentro de las imágenes y escalas gráficas de diverso tamaño y ubicación.

Todas las muestras se observan en condiciones de alto vacío. Para el uso corriente éstas se metalizan con oro-paladio (en un metalizador Termo VG Scientific SC 7620). Para los casos especiales de muestras que no puedan ser metalizadas (holotipos, etc.), el microscopio puede tomar imágenes de muestras nativas (generalmente a 1 kV), disminuyendo por lo general la calidad de la imagen.

### 5.3 ANALISIS DE RESULTADOS

Por un lado, el análisis debe estar enfocado en probar la hipótesis sugerida para el proyecto de investigación en donde se describen los elementos fundamentales de dicha investigación considerando los factores experimentales y teóricos para general una relación entre ellos por medio de los resultados presentes.

La información y resultados establecidos en este apartado se muestran tanto de forma cualitativa como cuantitativa para su mayor comprensión.

### 5.3.1. Análisis funcional

Dentro del análisis funcional se evalúan las propiedades representativas para el material compuesto y, a partir de ello, se establecen los modelos matemáticos que favorecen el desarrollo del material para su futuro uso en aplicaciones de ingeniería, basados en los resultados matemáticos.

Para la evaluación del material de plástico - madera se hizo uso de las siguientes propiedades para su respectiva representación matemática.

- Temperatura
- Módulo de elasticidad
- Dureza
- Resistencia última

Y en segundo plano, se plantea la composición del material plástico de acuerdo a la siguiente clasificación.

Composición:

- 90% Polipropileno- 10% Aserrín
- 80% Polipropileno- 20% Aserrín
- 70% Polipropileno-30% aserrín
- 60% Polipropileno-40% Aserrín

Para el análisis funcional, se emplearon los materiales compuestos elaborados con las mallas 30 y 40 respectivamente.

Por lo tanto, con lo relacionado a los modelos matemáticos se inicia con la malla 30.

Malla30, composiciones 90-10, 80-20, 70-30, 60-40, en porcentaje, plástico-aserrín respectivamente.

$$\begin{aligned}
 T_1 + T_2 + T_3 + T_4 &= MC_{90-10} \\
 T_1 + T_2 + T_3 + T_4 &= MC_{80-20} \\
 T_1 + T_2 + T_3 + T_4 &= MC_{70-30} \\
 T_1 + T_2 + T_3 + T_4 &= MC_{60-40}
 \end{aligned}
 \dots\dots\dots(33)$$

Sustituyendo los valores en el sistema, las unidades de la temperatura son °C:

$$\begin{aligned}
 68 + 66 + 68 + 64 &= MC_{90-10} \\
 69 + 70 + 70 + 65 &= MC_{80-20} \\
 70 + 69 + 71 + 69 &= MC_{70-30} \\
 71 + 71 + 68 + 70 &= MC_{60-40}
 \end{aligned}
 \dots\dots\dots(34)$$

Aplicando los principios de valores característicos se tiene:

$$|\lambda I - A| = 0$$

$$\begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 68 & 66 & 68 & 64 \\ 69 & 70 & 70 & 65 \\ 70 & 69 & 71 & 69 \\ 71 & 71 & 68 & 70 \end{bmatrix} = 0 \dots\dots\dots(35)$$

$$\begin{bmatrix} (\lambda - 68) & -66 & -68 & -64 \\ -69 & (\lambda - 70) & -70 & -65 \\ -70 & -69 & (\lambda - 71) & -69 \\ -71 & -71 & -68 & (\lambda - 70) \end{bmatrix} = 0 \dots\dots\dots(36)$$

Obteniendo el polinomio característico y a su vez resolviendo el polinomio, se obtienen los siguientes valores propios:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 1.28 \\ \lambda_2 &= 274.70 \\ \lambda_3 &= 1.50 + 2.37 \\ \lambda_4 &= 1.50 - 2.37 \end{aligned}$$

Considerando que un valor óptimo de la temperatura para la pieza final es de 68.70°C, el valor de  $\lambda_1 = 1.28$ , es el que se debe considerar para la temperatura, esto indica que para el material compuesto de plástico y madera puede variar en el siguiente rango de temperaturas finales.

$$67.42^\circ\text{C} \leq T \leq 69.98^\circ\text{C}$$

Malla 40 composiciones 90-10, 80-20, 70-30, 60-40, en porcentaje, plástico-aserrín respectivamente.

$$\begin{aligned} 60 + 61 + 62.5 + 63 &= MC_{90-10} \\ 59.8 + 60.3 + 61.5 + 64 &= MC_{80-20} \dots\dots\dots(37) \\ 59 + 61 + 61 + 62 &= MC_{70-30} \\ 60 + 58.7 + 61 + 60.5 &= MC_{60-40} \end{aligned}$$

Aplicando los principios de valores característicos se tiene:

$$|\lambda I - A| = 0$$

$$\begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 60 & 61 & 62.5 & 63 \\ 59.8 & 60.3 & 61.5 & 64 \\ 59 & 61 & 61 & 62 \\ 60 & 58.7 & 61 & 60.5 \end{bmatrix} = 0 \dots\dots\dots(38)$$

$$\begin{vmatrix} (\lambda - 60) & -61 & -62.5 & -63 \\ -59.8 & (\lambda - 60.3) & -61.5 & -64 \\ -59 & -61 & (\lambda - 61) & -62 \\ -60 & -58.7 & -61 & (\lambda - 60.5) \end{vmatrix} = 0 \dots\dots\dots(39)$$

Obteniendo el polinomio característico y a su vez resolviendo el polinomio, se obtienen los siguientes valores propios:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 2.43 \\ \lambda_2 &= -0.71 \\ \lambda_3 &= -0.63 + 1.24 \\ \lambda_4 &= -0.63 - 1.24 \end{aligned}$$

La temperatura para la pieza final en la malla 40 es de 60.96°C, el valor de  $\lambda_1 = 2.43$ , es el que se debe considerar para la temperatura y el valor puede variar en el siguiente rango de temperaturas finales.

$$58.53^\circ\text{C} \leq T \leq 63.39^\circ\text{C}$$

El segundo parámetro a evaluar es módulo de Young cuyas unidades son en MPa, de igual forma se lleva a cabo la evaluación por medio de eigenvalores y obtener los valores correspondientes como óptimos.

Malla 30 con las composiciones correspondientes, ya mencionadas con anterioridad.

$$\begin{aligned} E_1 + E_2 + E_3 + E_4 &= MC_{90-10} \\ E_1 + E_2 + E_3 + E_4 &= MC_{80-20} \dots\dots\dots(40) \\ E_1 + E_2 + E_3 + E_4 &= MC_{70-30} \\ E_1 + E_2 + E_3 + E_4 &= MC_{60-40} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1.83 + 1.11 + 1.90 + 1.81 &= MC_{90-10} \\ 1.40 + 1.88 + 1.35 + 1.47 &= MC_{80-20} \dots\dots\dots(41) \\ 1.33 + 1.06 + 1.72 + 1.50 &= MC_{70-30} \\ 1.95 + 1.59 + 1.04 + 1.23 &= MC_{60-40} \end{aligned}$$

Utilizando la definición de valores propios.

$$|\lambda I - A| = 0$$

$$\begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1.83 & 1.11 & 1.90 & 1.81 \\ 1.40 & 1.88 & 1.35 & 1.47 \\ 1.33 & 1.06 & 1.72 & 1.50 \\ 1.95 & 1.59 & 1.04 & 1.23 \end{bmatrix} = 0 \dots\dots\dots(42)$$

$$\begin{vmatrix} (\lambda - 1.83) & -1.11 & -1.90 & -1.81 \\ -1.40 & (\lambda - 1.88) & -1.35 & -1.47 \\ -1.33 & -1.06 & (\lambda - 1.72) & -1.50 \\ -1.95 & -1.59 & -1.04 & (\lambda - 1.23) \end{vmatrix} = 0 \dots\dots\dots(43)$$

Después del polinomio característico se da solución y se obtienen los siguientes valores propios:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= -0.27 \\ \lambda_2 &= 6.05 \\ \lambda_3 &= 0.68 \\ \lambda_4 &= 0.18 \end{aligned}$$

El resultado que nos ofrecen los eigenvalores hace referencia al valor máximo que debe tomar el Módulo de Young en el material compuesto para cada una de las composiciones, el cual se encuentra en el valor de: **1.69 GPa**.

A continuación se realiza el mismo método para el material compuesto en donde la malla es el número 40 y sus respectivas composiciones.

$$\begin{aligned} 1.53 + 1.98 + 1.79 + 1.29 &= MC_{90-10} \\ 2.06 + 1.65 + 2.14 + 1.87 &= MC_{80-20} \\ 1.19 + 1.47 + 1.04 + 1.26 &= MC_{70-30} \\ 0.96 + 1.53 + 1.11 + 1.70 &= MC_{60-40} \end{aligned} \dots\dots\dots(44)$$

Utilizando la definición de valores propios.

$$|\lambda I - A| = 0$$

$$\begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1.53 & 1.98 & 1.79 & 1.29 \\ 2.06 & 1.65 & 2.14 & 1.87 \\ 1.19 & 1.47 & 1.04 & 1.26 \\ 0.96 & 1.53 & 1.11 & 1.70 \end{bmatrix} = 0 \dots\dots\dots(45)$$

$$\left| \begin{bmatrix} (\lambda - 1.53) & -1.98 & -1.79 & -1.29 \\ -2.06 & (\lambda - 1.65) & -2.14 & -1.87 \\ -1.19 & -1.47 & (\lambda - 1.04) & -1.26 \\ -0.96 & -1.53 & -1.11 & (\lambda - 1.70) \end{bmatrix} \right| = 0 \dots\dots\dots(46)$$

Después del polinomio característico se da solución al y se obtienen los siguientes valores propios:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 6.16 \\ \lambda_2 &= -0.59 \\ \lambda_3 &= -0.21 \\ \lambda_4 &= 0.56 \end{aligned}$$

En esta evaluación se considera y se interpreta como el valor máximo que se puede obtener en la evaluación del material compuesto a desarrollar, el cual será como máximo de 2.09 MPa.

Continuando con las propiedades a evaluar se tiene la dureza, la cual se evaluará con el método utilizado hasta el momento con los valores propios.

$$\begin{aligned} D_1 + D_2 + D_3 + D_4 &= MC_{90-10} \\ D_1 + D_2 + D_3 + D_4 &= MC_{80-20} \dots\dots\dots(47) \\ D_1 + D_2 + D_3 + D_4 &= MC_{70-30} \\ D_1 + D_2 + D_3 + D_4 &= MC_{60-40} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 73 + 72.5 + 73.5 + 74.5 &= MC_{90-10} \\ 75.5 + 74 + 71.5 + 73.5 &= MC_{80-20} \dots\dots\dots(48) \\ 74.5 + 74 + 71.5 + 75.5 &= MC_{70-30} \\ 70 + 72 + 71.5 + 71 &= MC_{60-40} \end{aligned}$$

Apoyando los cálculos con la definición de valores propios.

$$|\lambda I - A| = 0$$

$$\left[ \begin{array}{cccc} \lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{cccc} 73 & 72.5 & 73.5 & 74.5 \\ 75.5 & 74 & 71.5 & 73.5 \\ 74.5 & 74 & 71.5 & 75.5 \\ 70 & 72 & 71.5 & 71 \end{array} \right] = 0 \dots\dots\dots(49)$$

$$\left| \begin{bmatrix} (\lambda - 73) & -72.5 & -73.5 & -74.5 \\ -75.5 & (\lambda - 74) & -71.5 & -73.5 \\ -74.5 & -74 & (\lambda - 71.5) & -75.5 \\ -70 & -72 & -71.5 & (\lambda - 71) \end{bmatrix} \right| = 0 \dots \dots \dots (50)$$

Después del polinomio característico se da solución al y se obtienen los siguientes valores propios:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 291.97 \\ \lambda_2 &= -0.0017 + 1.65 \\ \lambda_3 &= -0.0017 - 1.65 \\ \lambda_4 &= -2.47 \end{aligned}$$

Para la dureza en la malla 30 el rango de durezas Shore D, se encuentre dentro de:

$$70.53 \leq D \leq 75.47$$

Para el caso de la malla 40 con las respectivas composiciones da como resultado las siguientes matrices y valores propios, de acuerdo a la descripción matemática que se describe.

$$\begin{aligned} 74 + 73.5 + 75 + 73 &= MC_{90-10} \\ 75 + 75 + 76 + 75.5 &= MC_{80-20} \\ 75 + 74.5 + 74 + 73.5 &= MC_{70-30} \\ 76 + 77.5 + 76.5 + 76 &= MC_{60-40} \end{aligned} \dots \dots \dots (51)$$

Nuevamente utilizando valores característicos, se tiene:

$$|\lambda I - A| = 0$$

$$\left| \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 74 & 73.5 & 75 & 73 \\ 75 & 75 & 76 & 75.5 \\ 75 & 74.5 & 74 & 73.5 \\ 76 & 77.5 & 76.5 & 76 \end{bmatrix} \right| = 0 \dots \dots \dots (52)$$

$$\left| \begin{bmatrix} (\lambda - 74) & -73.5 & -75 & -73 \\ -75 & (\lambda - 75) & -76 & -75.5 \\ -75 & -74.5 & (\lambda - 74) & -73.5 \\ -76 & -77.5 & -76.5 & (\lambda - 76) \end{bmatrix} \right| = 0 \dots \dots \dots (53)$$

Calculando el polinomio característico y evaluándolo da como resultado los siguientes valores propios.

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= 1.16 \\ \lambda_2 &= 299.98 \\ \lambda_3 &= -0.74 \\ \lambda_4 &= -1.40\end{aligned}$$

Para la evaluación de la dureza en la malla 40 para el material compuesto con las composiciones previstas, el rango de durezas Shore D, se encuentre en el siguiente rango.

$$73.84 \leq D \leq 76.16$$

La última propiedad a evaluar con valores característicos es el esfuerzo último  $\sigma$ , con unidades de MPa, de la siguiente manera para la malla 30.

$$\begin{aligned}\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4 &= MC_{90-10} \\ \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4 &= MC_{80-20} \\ \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4 &= MC_{70-30} \\ \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4 &= MC_{60-40}\end{aligned} \dots\dots\dots(54)$$

$$\begin{aligned}26.78 + 29.81 + 29.21 + 21.65 &= MC_{90-10} \\ 26.38 + 26.38 + 25.78 + 26.28 &= MC_{80-20} \\ 24.17 + 23.66 + 21.55 + 23.36 &= MC_{70-30} \\ 21.35 + 23.16 + 23.97 + 20.74 &= MC_{60-40}\end{aligned} \dots\dots\dots(55)$$

Apoyando los cálculos con la definición de valores propios.

$$|\lambda I - A| = 0$$

$$\begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 26.78 & 29.81 & 29.21 & 21.65 \\ 26.38 & 26.38 & 25.78 & 26.28 \\ 24.17 & 23.66 & 21.55 & 23.36 \\ 21.35 & 23.15 & 23.97 & 20.74 \end{bmatrix} = 0 \dots\dots\dots(56)$$

$$\begin{bmatrix} (\lambda - 26.78) & -29.81 & -29.21 & -21.65 \\ -26.38 & (\lambda - 26.38) & -25.78 & -26.28 \\ -24.17 & -23.66 & (\lambda - 21.55) & -23.36 \\ -21.35 & -23.16 & -23.97 & (\lambda - 20.74) \end{bmatrix} = 0 \dots\dots\dots(57)$$

Después del polinomio característico los valores propios son:

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= 98.75 \\ \lambda_2 &= 1.31 \\ \lambda_3 &= -4.36 \\ \lambda_4 &= -0.25\end{aligned}$$

Por lo tanto y de acuerdo a los resultados que ofrece este análisis matemático, se tiene que el esfuerzo para la malla 30 se encontrará en un intervalo de:

$$23.33 \leq \sigma \leq 25.95$$

Se realiza el mismo análisis para la malla 40 y sus porcentajes correspondientes para el desarrollo del material compuesto.

$$\begin{aligned}26.78 + 29.81 + 29.21 + 21.65 &= MC_{90-10} \\ 26.38 + 26.38 + 25.78 + 26.28 &= MC_{80-20} \\ 24.17 + 23.66 + 21.55 + 23.36 &= MC_{70-30} \\ 21.35 + 23.16 + 23.97 + 20.74 &= MC_{60-40}\end{aligned} \dots\dots\dots(58)$$

Utilizando la ecuación para determinar de valores propios.

$$|\lambda I - A| = 0$$

$$\begin{vmatrix} \lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 28.71 & 27.58 & 29.21 & 29.01 \\ 24.17 & 25.48 & 24.47 & 26.08 \\ 20.95 & 21.75 & 21.85 & 22.56 \\ 20.14 & 22.96 & 22.46 & 21.95 \end{vmatrix} = 0 \dots\dots\dots(59)$$

$$\begin{vmatrix} (\lambda - 28.71) & -27.58 & -29.21 & -29.01 \\ -24.17 & (\lambda - 25.48) & -24.47 & -26.08 \\ -20.95 & -21.75 & (\lambda - 21.85) & -22.56 \\ -20.14 & -22.96 & -22.46 & (\lambda - 21.95) \end{vmatrix} = 0 \dots\dots\dots(60)$$

Después del polinomio característico los valores propios son:

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= 97.11 \\ \lambda_2 &= 1.40 \\ \lambda_3 &= 0.50 \\ \lambda_4 &= -1.02\end{aligned}$$

Con estos resultados, se tiene que el esfuerzo último para la malla 40 para este material compuesto de plástico y madera se encontrará en un intervalo de:

$$22.93 \leq \sigma \leq 25.73$$

Los resultados del análisis funcional se describen en la tabla 13.

Tabla 13. Parámetros óptimos para el material compuesto

Propiedad Mecánica	Valor óptimo	
	Malla 30	Malla 40
Temperatura pieza final [°C]	$67.42 \leq T \leq 69.98$	$58.53 \leq T \leq 63.39$
Módulo de elasticidad [GPa]	1.64	2.09
Dureza Shore D	$70.53 \leq D \leq 75.47$	$73.84 \leq D \leq 76.16$
Esfuerzo último [MPa]	$23.33 \leq \sigma \leq 25.95$	$22.93 \leq \sigma \leq 25.73$

Con la tabla 13 se pueden analizar los parámetros de otros materiales para realizar una comparativa con lo cual se establece y define hacia donde se puede dirigir la aplicación de este nuevo material compuesto de productos reciclados, plástico-madera.

### 5.3.2. Material plástico

La figura 5.9 muestra el material reciclado que se obtuvo directamente de una empresa que se dedica a la fabricación de productos exclusivamente de polipropileno, en donde se tritura el producto que no cumple con las condiciones necesarias de calidad

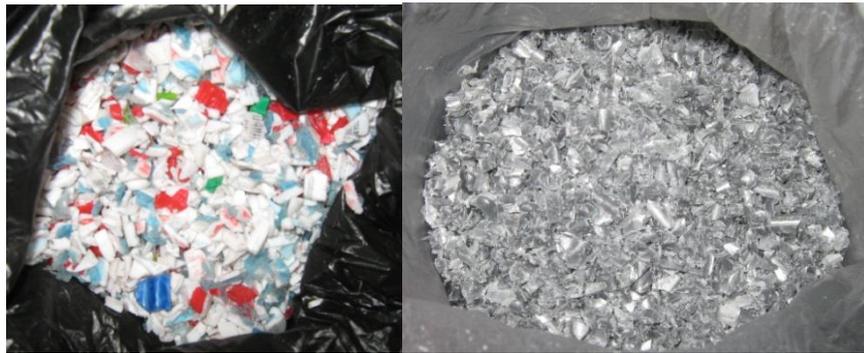


Fig. 5.9. Polipropileno reciclado

En la figura 5.9 se muestran los materiales de plástico reciclados que se utilizó como materia prima para las composiciones del material compuesto, en conjunto con el aserrín, y se observa que es un material triturado en donde no es controlado el color de este material.

### 5.3.3. Aserrín

En lo relacionado con la madera se consideró la utilización de pino. Como ya se mencionó, se hace uso de este material por la importancia que tiene en el país a través de su uso. Una vez que se tiene el producto, se extrae de las madereras el aserrín de pino para utilizarlo como refuerzo en el material compuesto. En la figura 5.10 se observa la morfología inicial del aserrín



Fig.5.10. Aserrín a granel listo previo a la separación y clasificación.

De la figura 5.10 se aprecia que el material (aserrín) se encuentra a granel y para su adecuado uso se tiene que realizar el proceso de separación el cual se describirá en la siguiente sección. Sin duda es importante resaltar que el aserrín hasta el momento no tiene ningún proceso previo para su aprovechamiento. Igualmente se debe considerar un control en la humedad de este producto para que el uso de este sea de manera satisfactoria para lograr un material compuesto en las mejores condiciones. Los resultados de la humedad utilizada en el aserrín de pino se muestran en la tabla 14.

Tabla 14. Humedad del aserrín en función de la especie de pino empleada

Pino	Humedad [%]
<b>Pinaster</b>	9.8
<b>Radiata</b>	12.4
<b>Sylvestris</b>	12.3

#### 5.3.4. Separación (cribado) del aserrín

Lo obtenido en la separación del material de pino se describe por medio de la figura 5.11, en donde se menciona paso a paso la forma de seleccionar y separar el aserrín en diferentes tamaños de acuerdo a cribas establecidas de manera estándar para esta actividad.



Fig. 5.11. Proceso para la separación (cribado) del aserrín de pino

De la figura 5.11 y como parte del resultado de esta sección, se tiene el seguimiento para controlar de manera eficiente el tamaño del material de refuerzo, aserrín, para un mayor aprovechamiento de esta materia prima reciclada.

Un dato importante por resaltar es la pérdida de materia prima que se tiene por una cantidad determinada de aserrín en el proceso de separación, lo cual se refleja en la siguiente tabla 15 y la figura 5.12.

Tabla 15. Datos con la cantidad de material separado y la pérdida del aserrín por la separación en las cribas.

No. Criba	Muestreo										Promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	Cantidad [g] 200	Cantidad [g] 200	Cantidad [g] 200	Cantidad [g] 200	Cantidad [g] 200	Cantidad [g] 200	Cantidad [g] 200	Cantidad [g] 200	Cantidad [g] 200	Cantidad [g] 200	
14	47.4	47.9	48	48.6	47.4	49.8	45	43.4	45.2	42.2	46.49
16	29.4	29	28.7	30.6	30.4	30.2	30	29.2	29.2	28.6	
20	47.6	46	45.6	46.9	47.3	46.9	48.5	47.4	46.9	47.2	
30	32.7	32.6	32.5	32	32.4	32.1	33.9	34.1	33.6	34.4	
40	42.5	43	43.3	39.6	40.8	40.7	42.4	43.2	44.5	46.9	
Final	199.6	198.5	198.1	197.7	198.3	199.7	199.8	197.3	199.4	199.3	
Pérdida	0.4	1.5	1.9	2.3	1.7	0.3	0.2	2.7	0.6	0.7	
Desviación	2.43	0.71	0.81	0.88	2.08						

De acuerdo a los resultados de la tabla 15, se obtiene la gráfica que se muestra en la figura 5.12.

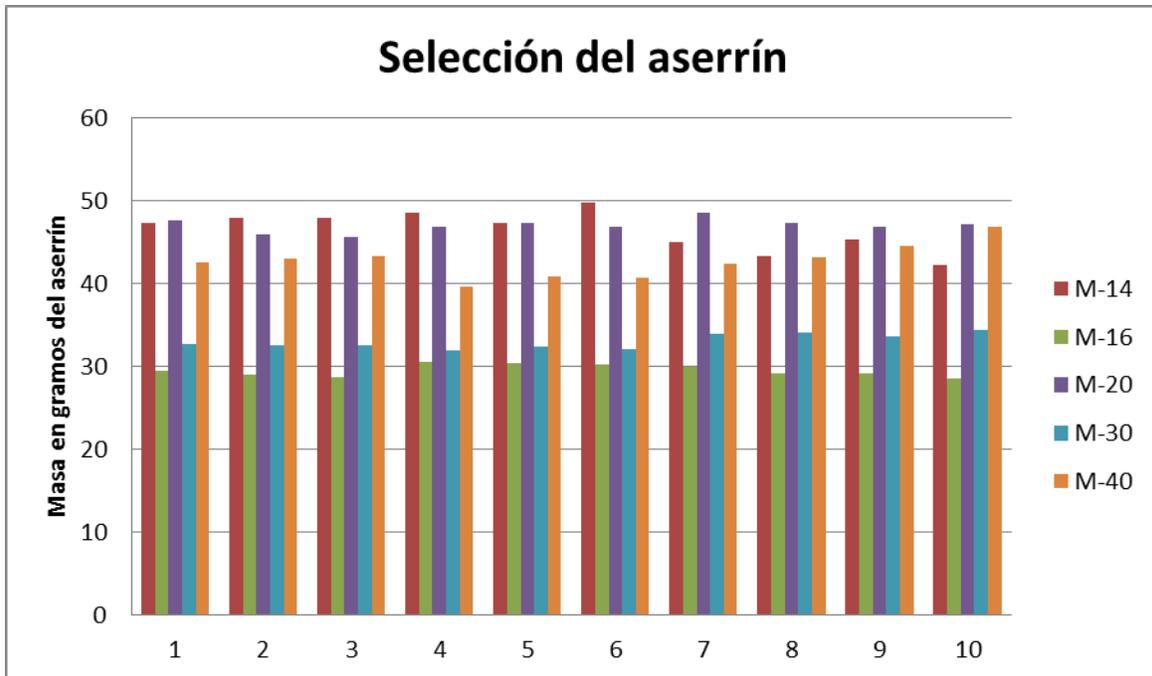


Fig. 5.12. Gráfica que refleja la pérdida del aserrín después del proceso de separación.

De la figura 5.12 se aprecia la forma en que existe la pérdida del aserrín al momento de realizar la selección y separación de las partículas de aserrín (hojuelas). Y de acuerdo a lo que ofrece el cálculo de la desviación estándar al seleccionar el aserrín, las cribas con malla 16 y 20 son las más adecuadas en cuanto al control de la materia prima de refuerzo con el material plástico y ello se representa por la cuestión matemática.

Sin embargo, para la obtención del material compuesto se considera la criba de malla 40 con el propósito de facilitar el proceso de obtención en las probetas y ello debido a la configuración que se contempla para el aserrín. En la siguiente sección se describe el tamaño del aserrín para su aprovechamiento en el material compuesto a desarrollar.

### 5.3.5. Observación macroscópica

La siguiente figura 5.13 es del aserrín observado a través de un macroscopio con un aumento máximo de 9x. En donde se logra visualizar claramente el aserrín.

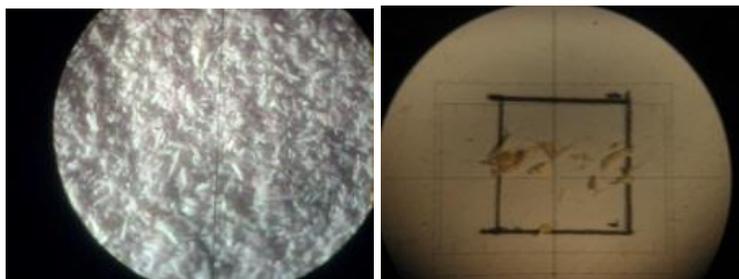


Fig. 5.13. Vistas de la geometría inicial del aserrín en un macroscopio 9 X

La figura 5.13 muestra como se observa la geometría de llegada del aserrín con el cual se trabaja como materia prima en el desarrollo del compuesto, en una de las

imágenes se considera un cuadrado de 1 cm por lado para obtener la medida de aserrín por centímetro cuadrado y posteriormente considerarse para la composición con el material plástico.

Con la observación en el macroscopio se establecen los estándares iniciales en cuanto se refiere a geometría y dimensiones del material de refuerzo a utilizar. Los datos se muestran en la tabla 16.

Tabla 16. Dimensiones del aserrín después de su observación en el macroscopio.

Eventos											Promedio
Dimensiones [mm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Largo	2	1.25	1.75	1.75	1.5	1.75	1.25	1.5	2.8	1.6	<u>1.72</u>
Ancho	0.19	0.15	0.17	0.23	0.15	0.17	0.18	0.15	0.18	0.17	<u>0.17</u>

### 5.3.7. Ensayos mecánicos

Los parámetros que se evalúan en este trabajo, como parte fundamental para el desarrollo del material compuesto, y se clasifican de la siguiente manera:

- a) Resistencia a la tensión
- b) Impacto
- c) Dureza

En los siguientes párrafos se describen, analizan y se establecen resultados obtenidos al aplicar los ensayos en el material para validar que cumple con propiedades mecánicas preestablecidas para su comportamiento dentro de las aplicaciones de ingeniería, con énfasis a su uso en comunidades rurales.

#### 5.3.7.1. Tracción

El equipo que se empleó es una Máquina Universal de Ensayos Mecánicos, Instron. A continuación se plasman los resultados y su análisis correspondiente.

Para la obtención de las probetas se recurrió a la fabricación, inicialmente, de moldes de aluminio para el proceso de inyección y para la generación de las muestras para los ensayos mecánicos de tracción e impacto, elaborados a través de fresado por medio de una máquina de control numérico, Cincinnati 500; control de mesa 840 x 360 mm, 500 x transversal 340 x 520 mm, 7000rpm, BT40, 5.5/7.5kw,

Los materiales compuestos, en diversas combinaciones, fueron, posteriormente, extruidos e inyectados en una extrusora GDE - 75 GIDING y en una inyectora Vulcano Manual, cuyas características, con mayor detalle, se presentan a continuación:

#### Extrusora GDE-75 GIDING

- Motor de 5HP
- Diámetro del tornillo 75 mm
- Relación longitud-diámetro 6.1

➤ Salida kg/hr 70-120

Inyectora Vulcano manual

- ❖ 45 gramos por inyección
- ❖ Temperatura del cañón 147°C
- ❖ Temperatura a la salida de la boquilla 185°C

La metodología con la cual se llevó a cabo este proceso se presenta en la figura 5.14.

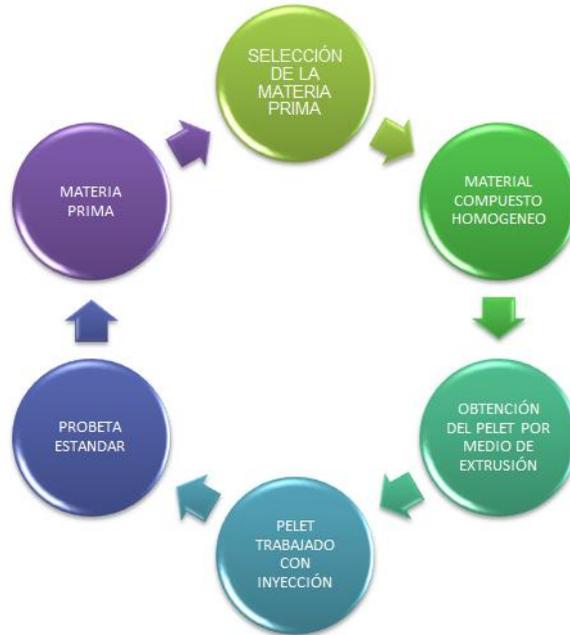


Fig. 5.14. Proceso para obtener piezas estándar para ensayos del material compuesto

En primer lugar se presentan los resultados de las probetas de material reciclado sin refuerzo que se muestran en la tabla 17.

Tabla 17. Resultados del ensayo de tracción para el material plástico reciclado

	Plástico [%]	Madera [%]	Punto de ruptura [MPa]	Carga soportada a tracción [KN]
Plateado	100	0	29.30	1.28
	100	0	30.58	1.34
	100	0	30.21	1.32
	100	0	30.58	1.34
	100	0	30.94	1.36
Negro	100	0	26.64	1.17
	100	0	25.44	1.11
	100	0	24.71	1.08
	100	0	24.62	1.08
	100	0	25.17	1.10
Dorado	100	0	32.03	1.40
	100	0	32.49	1.42
	100	0	32.03	1.40
	100	0	32.96	1.45
	100	0	32.03	1.40

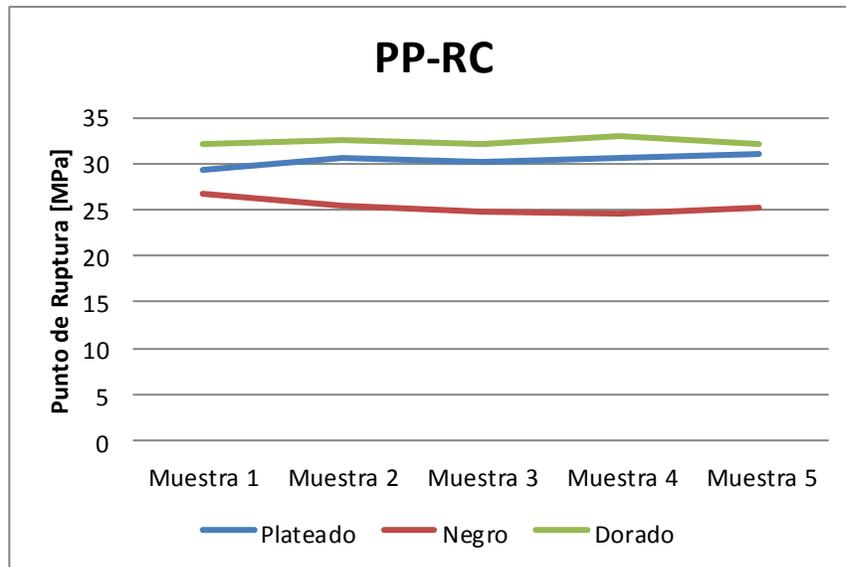


Fig. 5.15. Gráfica después de realizar el ensayo de tracción en piezas de material reciclado para el polipropileno

En la tabla 17 y en la figura 5.15 se puede observar que los datos son muy similares, aunque conviene resaltar un ligero aumento de la resistencia en el caso de las probetas de color dorado.

Para el inicio de las investigaciones en este trabajo se utilizaron las probetas con material de color plateado, ello debido a que se observa que se encuentran entre la media de todas las demás probetas evaluadas. En la figura 5.16 se muestra la aplicación del ensayo a tracción en las probetas de material compuesto.



Fig. 5.16. Detalle del ensayo de tracción para las probetas de materiales compuestos PPreциado-A

En la figura 5.17 se observan las probetas de material reciclado de polipropileno utilizado como referencia para la comparación.



Fig. 5.17. Probeta de tracción con polipropileno reciclado sin refuerzo.

Con las probetas anteriores se realizaron los ensayos correspondientes por medio del ensayo de tracción y se hacen las pruebas con cada una de ellas para lograr una base de datos bastante amplia para lograr las comparaciones requeridas y obtener parámetros controlables en el proceso de obtención del material compuesto.



Fig. 5.18. Máquina Universal Instron modelo 4206 de 150 kN para el desarrollo del ensayo de tracción.



Fig. 5.19. Probetas ensayadas de material (PP) reciclado

La figura 5.19 muestra las primeras probetas después de aplicar la carga para llevarlas a su punto de ruptura y con ello tener los resultados que más adelante se colocan en tablas. La evidencia de deformación que se observa en las probetas del material virgen es congruente con el comportamiento del PP reciclado.



Fig. 5.20. Probetas de material compuesto después del ensayo de tracción con una composición de 90-10 [%].

Los ensayos se realizaron para las composiciones establecidas en el desarrollo del material compuesto para su evaluación mecánica y la figura 5.20 muestra las probetas, a las cuales ya se les aplicó el ensayo y se aprecia que la fractura del material es aproximadamente en la misma zona para cada una de las probetas con la composición de 90% plástico y 10% aserrín de pino.



Fig. 5.21. Probetas de composición 60-40 [%], luego de ser sometidas al ensayo de tracción.

Igualmente se realiza el ensayo a las probetas con la composición de 60 %plástico y 40% aserrín, como se observa en la figura 5.21, la fractura es homogénea en las probetas del ensayo de tracción.

A continuación se muestra la gráfica general de las probetas a las cuales se les realizó el ensayo de tracción, en las diferentes composiciones tanto de la madera como del aserrín reciclados.

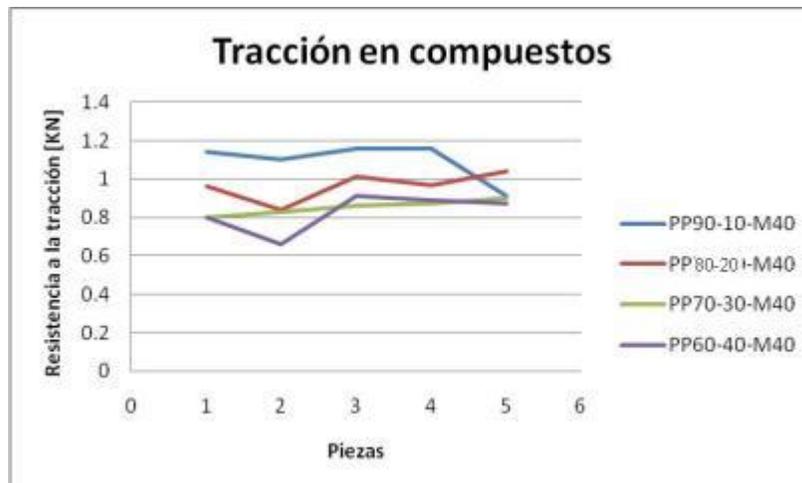


Fig. 5.22. Resistencia a Tracción para probetas en malla 40.

En la figura 5.22 se logra la apreciación del rango en el cual se encuentran los parámetros de resistencia para las probetas estandarizadas con la granulometría de malla 40. En donde se observa que la composición con la cual se tiene una mayor resistencia a la tracción es con 90% PP y 10% aserrín y la que menos resistencia muestra es la que contiene 40% de aserrín, aunque la diferencia es poco representativa. Una primera observación general al respecto, en estos materiales de malla 40 elaborados, es la ligera disminución que se observa con la adición de aserrín. Se considera que, pese a la

disminución de propiedades, los materiales compuestos generados, conservan un nivel de características suficientes para una serie de aplicaciones.

A continuación se presentan los resultados para el caso de las diferentes combinaciones asociadas ahora a la malla 30.

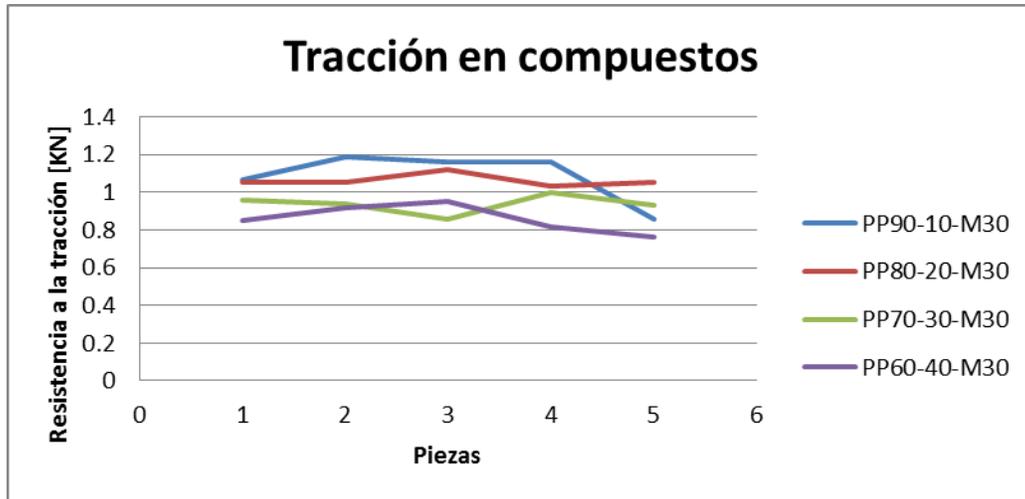


Fig. 5.23. Resistencia a la tracción en probetas malla 30 PP-Aserrín.

En la figura 5.23 se encuentran representadas las probetas, en función de la resistencia, obtenidas con granulometría de malla 30, que muestran una tendencia semejante a las reportadas en el caso de las muestras con malla 40.

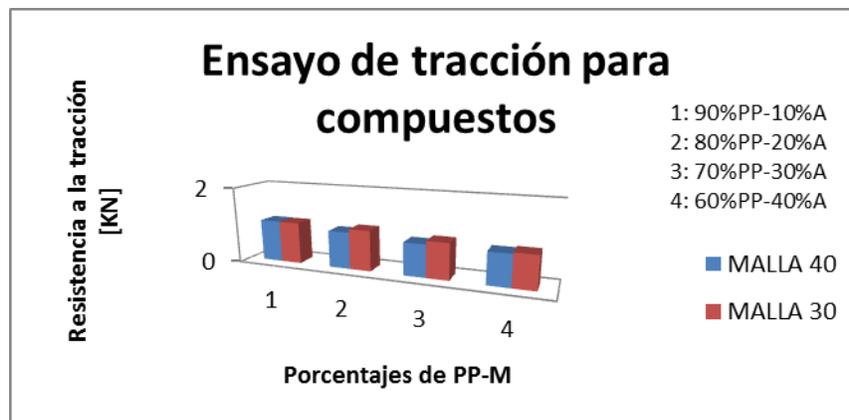


Fig. 5.24. Comparación de la resistencia a la tracción de los materiales compuestos en función del porcentaje de aserrín. La variación de los resultados es pequeña y son ligeramente mayores los valores cuando se empleó aserrín de mayor tamaño (malla 30).

La figura 5.24 se logra establecer de una manera visual las variaciones existentes entre las probetas que se obtienen con granulometría diferente. En específico con las trabajadas hasta el momento con aberturas de 0.6 y 0.425 mm.

Y es notorio nuevamente que las probetas con mayor capacidad para la resistencia a la tracción es la serie número 1 con las respectivas mallas de 30 y 40.

Por lo tanto en la tabla 18 se colocan los datos de acuerdo a lo establecido anteriormente con la composición de los materiales tanto del plástico como de la madera.

Tabla 18. Propiedades del material compuesto de composición 90-10, correspondientes al ensayo de tracción.

	Plástico [%]	Madera [%]	Malla [No]	Punto de ruptura [MPa]	Carga soportada a tracción [KN]
Plateado	90	10	40	28.71	1.14
	90	10	40	27.58	1.10
	90	10	40	29.21	1.16
	90	10	40	29.01	1.16
	90	10	40	22.86	0.91
Plateado	90	10	30	26.78	1.07
	90	10	30	29.81	1.19
	90	10	30	29.21	1.16
	90	10	30	29.21	1.16
	90	10	30	21.65	0.86

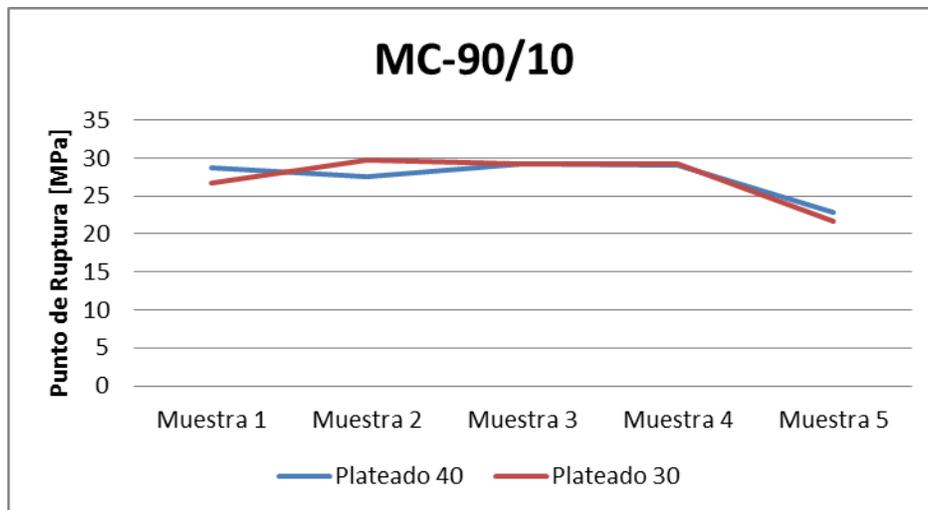


Fig. 5.25. Esfuerzo último para la composición de 90%PP y 10% aserrín, mallas 40 y 30

En la tabla 18 se encuentra que el promedio general de los resultados son muy semejantes en cuanto al compuesto con la malla 40 es de 1.094 [KN], en cuanto a la resistencia a la tracción y para la malla 30 de 1.088[KN].

Tabla 19. Propiedades del material compuesto 80-20, provenientes del ensayo de tracción

	Plástico [%]	Madera [%]	Malla [No]	Punto de ruptura [MPa]	Carga soportada a tracción [KN]
Plateado	80	20	40	24.17	0.96
	80	20	40	21.05	0.84
	80	20	40	25.48	1.01
	80	20	40	24.47	0.97
	80	20	40	26.08	1.04
Plateado	80	20	30	26.38	1.05
	80	20	30	26.38	1.05
	80	20	30	28.08	1.12
	80	20	30	25.78	1.03
	80	20	30	26.28	1.05

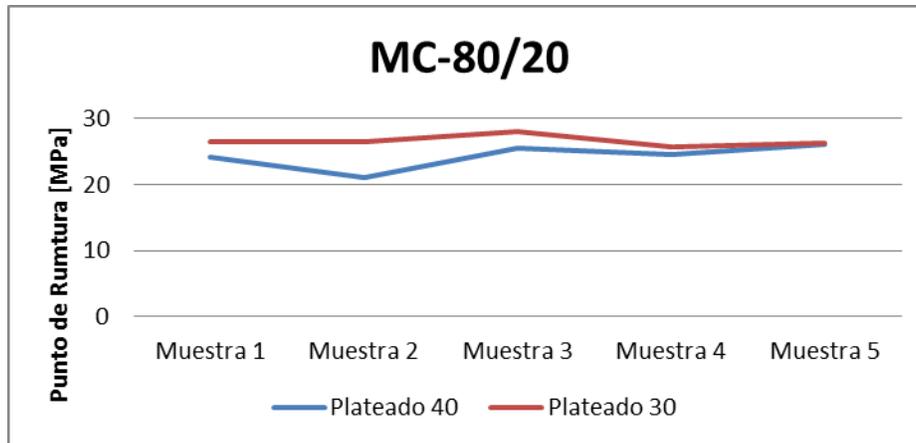


Fig. 5.26. Esfuerzo último para la composición 80%PP y 20% aserrín, mallas 40 y 30

Los resultados de la tabla 19 muestran que para la composición de ésta misma y la malla 40 tiene una resistencia de 0.964[KN], para la malla 30 es de 1.056 [KN].

Tabla 20. Propiedades del material compuesto 70-30, resultante del ensayo de tracción

Plástico [%]		Madera [%]	Malla [No]	Punto de ruptura [MPa]	Carga soportada a tracción [KN]
Plateado	70	30	40	20.14	0.80
	70	30	40	20.95	0.83
	70	30	40	21.75	0.86
	70	30	40	21.85	0.87
	70	30	40	22.56	0.90
Plateado	70	30	30	24.17	0.96
	70	30	30	23.66	0.94
	70	30	30	21.55	0.86
	70	30	30	25.08	1.00
	70	30	30	23.36	0.93

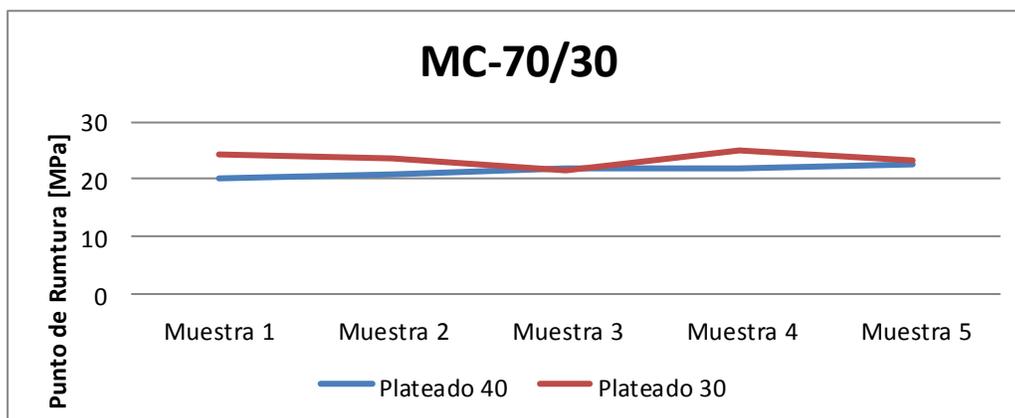


Fig.5.27. Esfuerzo último para la composición de 70%PP y 30% aserrín, malla 40 y 30

En la tabla 20 se lograron obtener los valores promedio de la resistencia a la tracción para el compuesto. Para la malla 40 es 0.852 [KN] y para la malla 30 se tiene el valor de 0.938[KN.]

Tabla 21. Propiedades para el material compuesto de 60-40, después de aplicar el ensayo de tracción.

Plástico [%]		Madera [%]	Malla [No]	Punto de ruptura [MPa]	Carga soportada a tracción [KN]
Plateado	60	40	40	20.14	0.80
	60	40	40	16.51	0.66
	60	40	40	22.96	0.91
	60	40	40	22.46	0.89
	60	40	40	21.95	0.87
Plateado	60	40	30	21.35	0.85
	60	40	30	23.16	0.92
	60	40	30	23.97	0.95
	60	40	30	20.74	0.82
	60	40	30	19.03	0.76

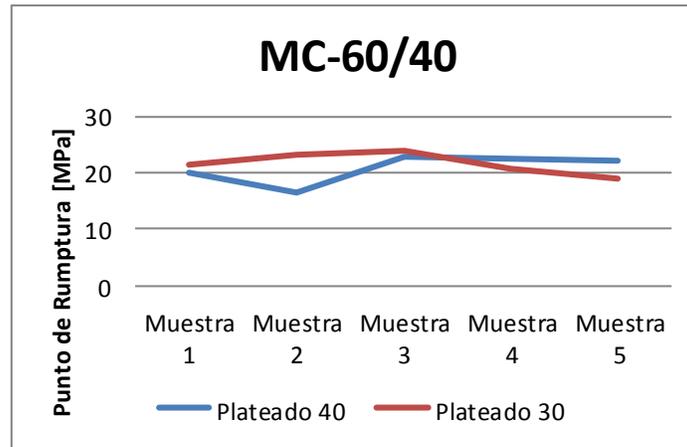


Fig. 5.28. Esfuerzo último para la composición de 60%PP y 40% aserrín, malla 40 y 30

En la tabla 21 se pueden ver los parámetros mecánicos de ruptura y resistencia a la tracción para la composición del material compuesto, 60% plástico-40% aserrín, de donde se encuentra que la resistencia para este compuesto con la malla 40 es 0.826 [KN] y para la malla 30 de 0.86 [KN]. En ésta misma se muestra un compendio de resultados.

Tabla 22. Valores comparativos de resistencia a la tracción de Materiales compuestos PP-Aserrín con diferentes combinaciones

Plástico [%]	Madera [%]	Malla [No]	Carga soportada a tracción[KN]
90	10	40	1.094
90	10	30	1.088
80	20	40	0.964
80	20	30	1.056
70	30	40	0.852
70	30	30	0.938
60	40	40	0.826
60	40	30	0.86

En la tabla 22 se aprecia claramente la variación en los datos de los materiales compuestos y se dan parámetros importantes que posteriormente se considerarán para las aplicaciones de los compuestos elaborados a partir de estas materias primas.

En la figura 5.29 se observa una gráfica en donde se muestran estos datos de una manera global y se puede destacar que conforme aumenta la cantidad de aserrín, la carga aplicada a la probeta disminuye y por ende la resistencia a la tracción se reduce ligeramente.

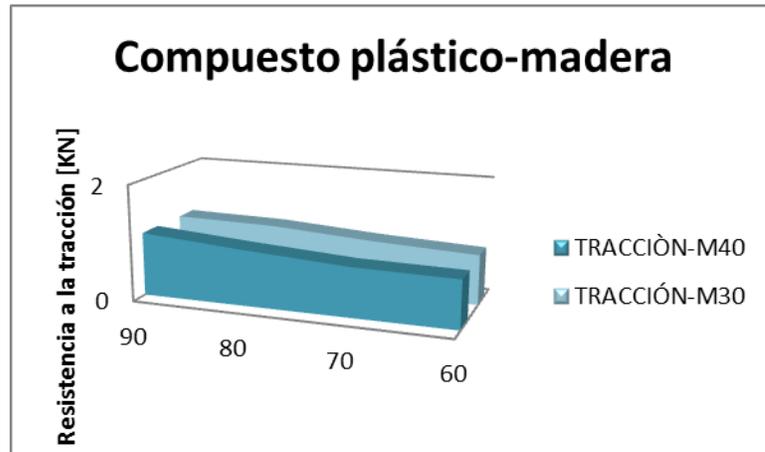


Fig. 5.29. Resistencia a la tracción del material virgen de polipropileno reciclado.

Como resultado final se presenta la tabla 23 comparativa del esfuerzo último, como parte de la caracterización del material compuesto.

Tabla 23. Datos comparativos como resultados del ensayo de tracción en el material compuesto, con las composiciones establecida.

	Esfuerzo último [MPa]	
	Malla 30	Malla 40
90%PP-10%A	27.33	24.48
80%PP-20%A	26.58	24.25
70%PP-30%A	23.56	22.05
60%PP-40%A	21.65	20.51

Como se puede corroborar, algunos comentarios de tipo general respecto a los resultados de los ensayos de tracción indican que al agregar una cantidad mayor de aserrín en la composición disminuye la deformación presente en las probetas de este ensayo, al igual se presenta un mejor desempeño del aserrín cuando se utiliza el aserrín un mayor tamaño. Con estos datos se considera que el material cuya composición se encuentra entre el 10 y 20 % de aserrín tiene mejor resistencia a la tensión y nos lleva a considerar que dicha composición es la que presenta una mejor adherencia en su estructura interna con el material plástico de polipropileno, con lo cual se llegan a los resultados esperados de acuerdo al comportamiento que mostraron las probetas durante el desarrollo del ensayo y observando que el porcentaje de error en relación al material reciclado denominado virgen disminuye entre un 9-18%.

### 5.3.7.2. Impacto

En el ensayo de impacto parte de lo primordial es analizar el fenómeno de la tenacidad del material. La tenacidad se expresa como la habilidad de un material para resistir un esfuerzo cuando se encuentra sujeto a cargas determinadas. Y este ensayo es conocido como aquel que tiene un comportamiento en donde se debe controlar la velocidad y la temperatura a la cual se realiza el ensayo.

Para el ensayo de impacto se consideran las mismas composiciones que se usaron en los otros ensayos mecánicos aplicados, aumentando una malla para tener datos más certeros en el éste ensayo mecánico, Estos resultados se muestran a continuación en los párrafos siguientes al igual que en las tablas y figuras correspondientes:

Tabla 24. Resultados del ensayo de impacto con el material compuesto de malla 20

Malla 20	
Descripción	Energía [kJ/m <sup>2</sup> ]
30%A-70%PP	12.1
20%A-80%PP	18
15%A-85%PP	17.6
10%A-90%PP	18.7
25%A-75%PP	21.3

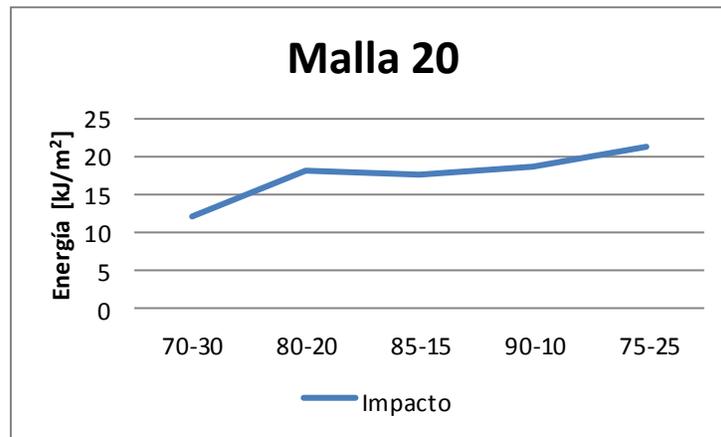


Fig. 5.30. Ensayo de impacto para el material compuesto en malla 20.

En la tabla 24 se aprecian los datos relacionados con la energía obtenida para la fractura de materiales compuestos PP-A de tamaño de malla 20.

Tabla 25. Resultados de las probetas de impacto en malla 30

MALLA 30	
DESCRIPCIÓN	ENERGÍA[KJ/m <sup>2</sup> ]
10%A-90%PP	9.2
15%A-85%PP	9.7
20%A-80%PP	14.2
25%A-75%PP	17.3
30%A-70%PP	13.1
35%A-65%PP	11.2
40%A-60%PP	7.5

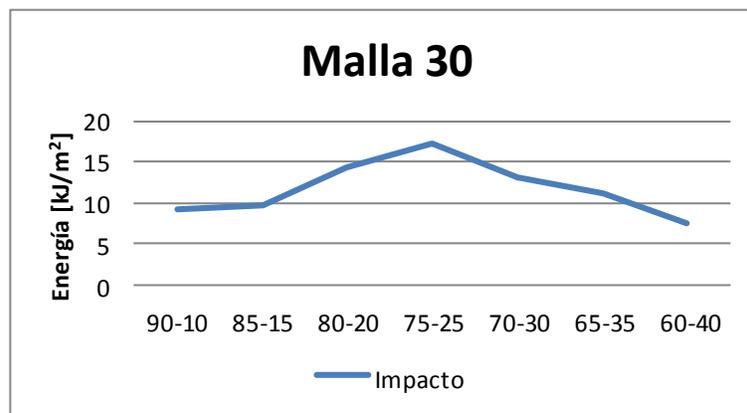


Fig.5.31. Ensayo de impacto para el material compuesto, malla 30.

En la tabla 25 se muestran, igualmente, los valores de la energía absorbida para las probetas con malla 30, en donde se aprecia que los valores oscilan entre 9.2 y 17.3 KJ/m<sup>2</sup> de acuerdo a la cantidad del aserrín combinada con el polipropileno.

Tabla 26. Resultados de impacto en la malla 40

Malla 40	
Descripción	Energía [kJ/m <sup>2</sup> ]
10%A-90%PP	15.2
15%A-85%PP	14.9
20%A-80%PP	16
25%A-75%PP	13.4
30%A-70%PP	11.8
35%A-65%PP	11.3
40%A-60%PP	15.4

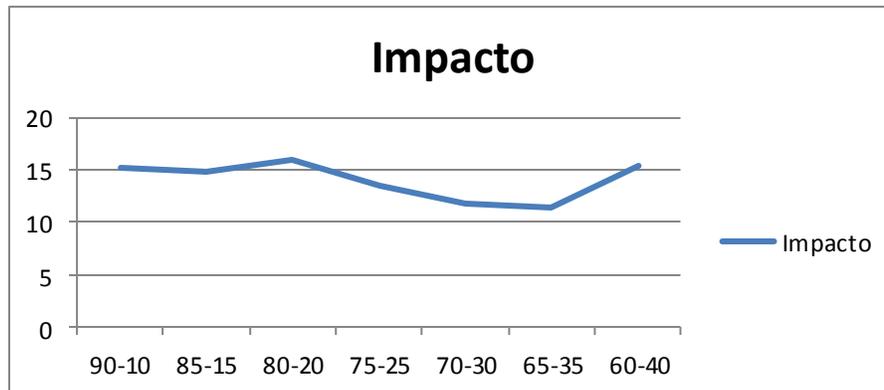


Fig.5.32. Ensayo de impacto para el material compuesto, malla 40.

En la tabla 26 (malla 40) se observan resultados que determinan que el material presenta un comportamiento más homogéneo con respecto al valor que está dando el ensayo de impacto.

De las tablas anteriores se llega a la conclusión de que conforme mayor sea la cantidad de aserrín se presenta una ligera tendencia a la disminución de su tenacidad, aunque conviene destacar que el mejor comportamiento parece estar asociado a la probeta de tamaño de malla 20 con 25% A y los materiales que parecen presentar un comportamiento más estable en cuanto a dicha tenacidad son los de malla 40 con una tendencia a una energía absorbida prácticamente constante.

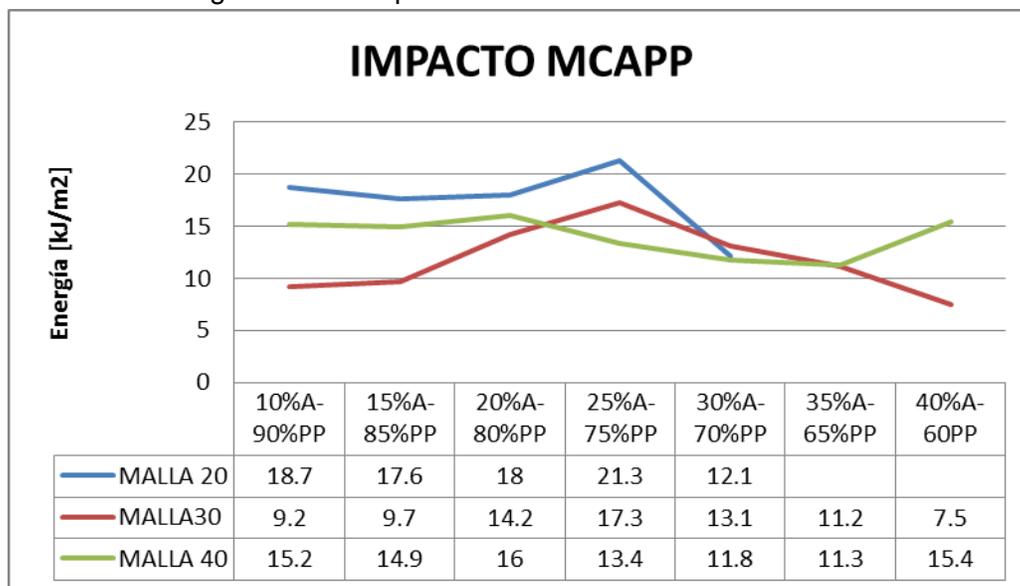


Fig. 5.33. Comparativa del ensayo de impacto para las mallas 20, 30 y 40.

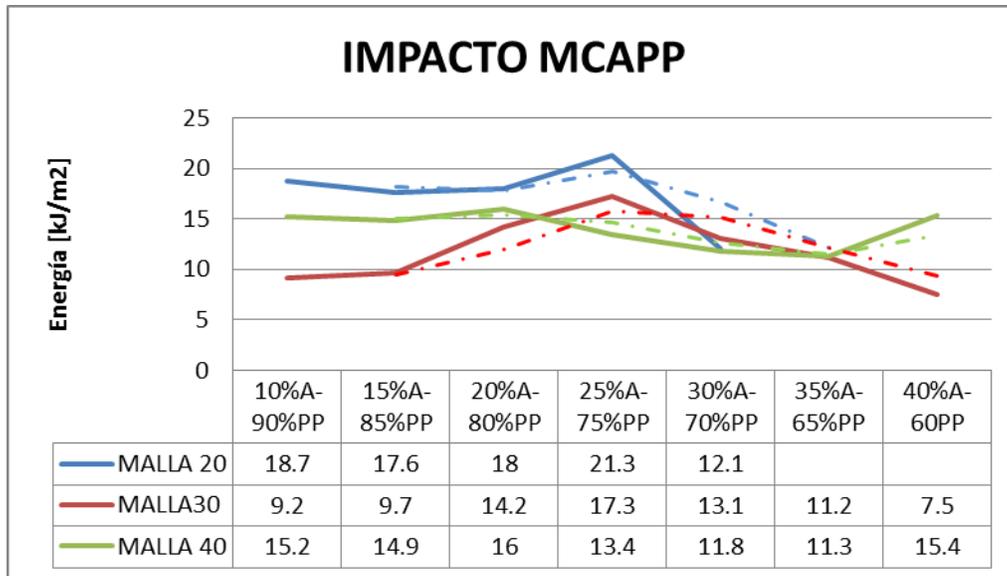


Fig. 5.34. Comparativa con líneas de tendencia óptimos.

De la revisión de las tablas ya mencionadas se obtiene que el material que tiene una mayor homogeneidad es el de malla 40 con una composición de 40% aserrín y 60% polipropileno y ello también permite visualizar una cierta coherencia con los datos obtenidos con anterioridad en el ensayo de tensión; ya que la curva más homogénea corresponde a la de malla 40.

Como parte del análisis de resultados del ensayo de impacto se tiene que el material con un comportamiento homogéneo es para la malla 40 ya que su gráfica es más estable a la de las otras mallas, por ello se tiene que este material es más tenaz y puede aprovecharse para diversas aplicaciones en donde esta propiedad tiene mayor relevancia de absorber cierta cantidad de energía para soportar la fractura y el dato que sobresale de este ensayo es el de  $16\text{KJ/m}^2$ , que corresponde a la composición de 80%PP-20%A.

Para las otras composiciones se buscaran las aplicaciones tangibles que se pueden adecuar de acuerdo a la tenacidad con la que cuentan cada una de ellas.

#### 5.3.7.3. Dureza

En el ensayo de dureza lo relevante por mencionar es que se trata de una prueba la cual se establece como un medio para determinar la resistencia de un material al corte o penetración y éstas se dividen en macropruebas o macroensayos, esto es cuando la indentación es visible a simple vista, y las micropruebas o microensayos en donde se hace uso de un microscopio para poder observar la indentación, para este caso de estudio se utilizan los macroensayos por el tipo de material y durómetro.

A continuación en la tabla 27 se presentan los resultados al aplicar el ensayo de dureza en el material compuesto.

Tabla 27. Ensayo de dureza Shore D para el material compuesto

SHORE D					
Malla	PP VIRGEN	90%PP-10%A	80%PP-20%A	70%PP-30%A	60%PP-40%A
30	74.7	73.25	73.66	74.04	69.6
40	74.7	74	75.4	73.8	75.9

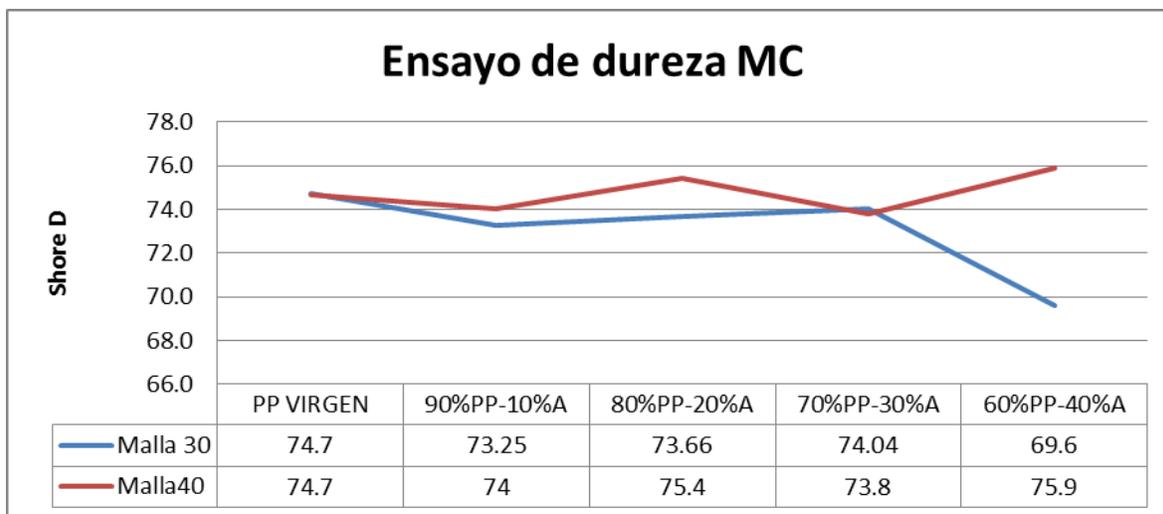


Fig. 5.35. Gráfica comparativa del ensayo de dureza en el material compuesto

En esta gráfica de la figura 5.35 se aprecia cómo se presenta un ligero aumento de la dureza de las piezas conforme se incrementa la cantidad de aserrín agregado al polipropileno, aunque se puede considerar que la variación es pequeña y puede plantearse como una dureza prácticamente constante de los materiales compuestos PP-A ensayados, lo cual se puede interpretar en términos de que la presencia de aserrín no modifica esta propiedad de los materiales compuestos elaborados.



Fig. 5.36. Secuencia en el desarrollo del ensayo de dureza

En la figura 5.36 se identifican las etapas mencionadas con anterioridad para llevar a cabo el ensayo de dureza en el material compuesto de plástico con madera, en ésta se aprecia la secuencia del ensayo para seguir un procedimiento continuo en la caracterización del material.

De acuerdo al ensayo de dureza realizado a las composiciones correspondientes de plástico y madera (aserrín) el que mayor dureza obtuvo y que se recomienda para su uso

en aplicaciones que restringen a este ensayo mecánico es el correspondiente a la malla 40 y composición 60%PP-40%A. Considerando que las piezas obtenidas con la malla 30 deberán ser analizadas para contemplar alguna otra propiedad mecánica predominante y se pueda sustituir algún material por éste y tener las aplicaciones adecuadas.

### 5.3.8. Observación microscopio

La observación en microscopio se da en dos casos:

- 2) Óptico
- 3) Electrónico de barrido

Cada una de las técnicas de microscopía ofrecen resultados diversos que permiten valorar los aspectos relevantes en el desarrollo del material compuesto de plástico-madera. A continuación se describen los resultados que ofreció la observación microscópica.

#### 5.3.8.1. Microscopio Óptico

La microscopía óptica consiste en utilizar un haz de luz para estudiar la microestructura de los materiales que generalmente son opacos a la luz visible, por ello es que la superficie es susceptible para su observación y la luz del microscopio lo que hace es generar la reflexión de un sistema interno del microscopio para la observación. En los siguientes párrafos se describen las observaciones realizadas en un microscopio óptico.

La observación en microscopio óptico se llevó a cabo por medio del siguiente proceso de la figura 5.37.

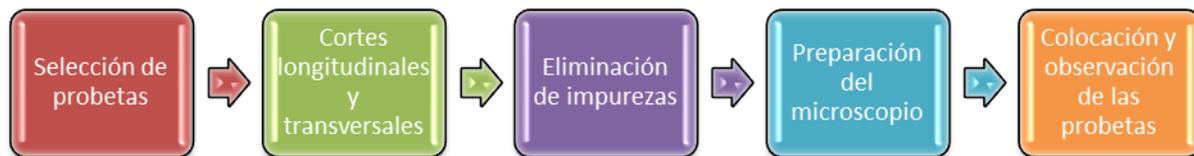


Fig.5.37. Procedimiento para la observación por medio de microscopio óptico

En la figura 5.38 se observa el microscopio óptico utilizado para la visualización del material compuesto con las composiciones determinadas y una imagen del material plástico reciclado virgen.



Fig.5.38. Microscopio óptico y una imagen del material de PP virgen reciclado obtenida con el equipo

En la figura 5.39 se muestra el microscopio utilizado para observar el material compuesto, el equipo cuenta con cinco lentes: a)5X, b) 10X, c)20X, d)50X y e)100X, los cuales permiten realizar la observación óptica del material compuesto. Igualmente se logra apreciar la dirección que toman las fibras del material de refuerzo, madera (aserrín), dentro del polímero y con esto se puede establecer la conclusión si el material presenta un refuerzo orientado o no.

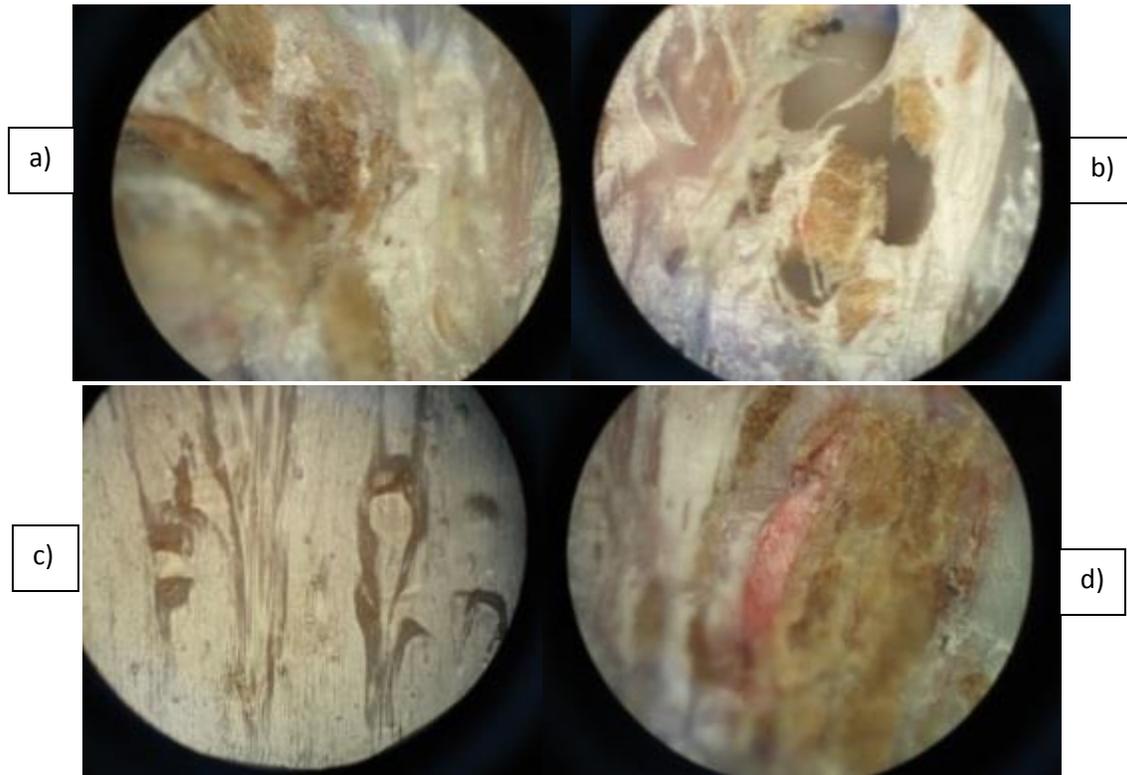


Fig. 5.39. Imagen del aserrín dentro del material compuesto mostrando su orientación y alguna evidencia de que tan embebido está e infiriendo la condición de adherencia alcanzada. 50X

Como se observa en la figura 5.39 la madera se encuentra como refuerzo y embebida en el material plástico, lo cual es un síntoma de una buena adherencia. En las siguientes figuras se encuentran los acercamientos para cada una de las combinaciones generadas de aserrín con polipropileno. Las imágenes mostradas corresponden a las piezas ensayadas por tracción para apreciar la continuidad que existe entre las zonas límites de cada material, aserrín y polipropileno.

En la figura 5.40 se muestran observaciones con el microscopio óptico que van desde el 10% de aserrín hasta el 40% de este mismo y los aumentos utilizados son de 10X, 20X y 50X. La intención de realizar la observación va dirigida en el sentido de poder observar la dirección que toma el material de refuerzo en el material plástico y como se encuentra adherido este mismo con el polipropileno.

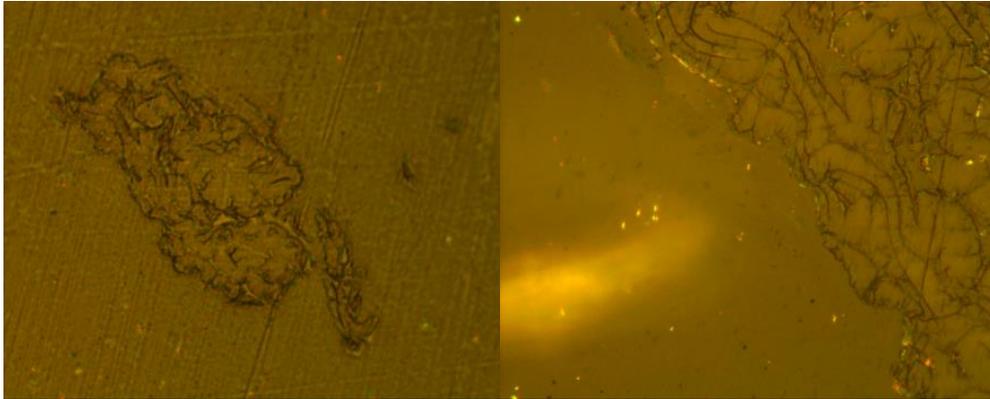


Fig. 5.40. Imágenes de la orientación que presenta el aserrín en el material compuesto con 10% de refuerzo, aumentos de 20x y 50x

En la figura 5.40 se aprecia de manera directa la forma en la cual se encuentra la partícula de aserrín sobre el material plástico, lo cual se aprecia en la figura de la izquierda y se nota que la fibra tiene una apariencia de hojuela, el espesor de esta fibra es de aproximadamente de 0.2 mm. En la figura de la derecha se observa con un aumento de 50X un detalle de cómo quedó integrada la partícula en el polímero. Se tiene un 10% de material de refuerzo.

En la figura 5.41 se muestra el aspecto del material compuesto PP-Aserrín con una adición de 20% aserrín - 80 % de PP y se puede observar un aspecto semejante al del caso anterior con las partículas orientadas y mostrando también rasgos de lo que se puede intuir como una buena adherencia en razón de como ha quedado embebida dicha partícula. Se puede postular que la orientación del refuerzo puede estar asociada a los procesos de extrusión-inyección previamente aplicados.

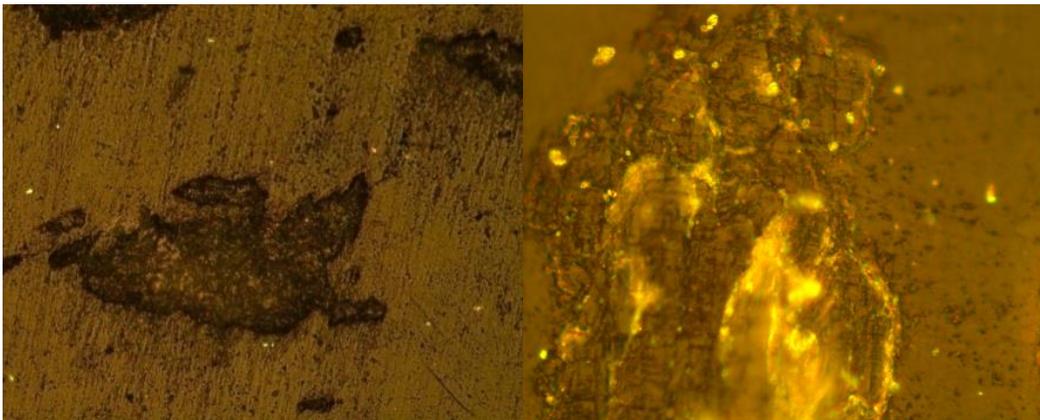


Fig. 5.41. Material compuesto de 20% aserrín, aumentos de 20x, 50x. MO

La figura de la izquierda muestra una fibra de aserrín observada en 20X en donde esta misma sigue la trayectoria del flujo en el momento de realizar el proceso de inyección. Se puede observar que existe adherencia entre los materiales, ya que no hay alguna fisura que se detecte en esta unión a través de la figura mostrada.

En la figura 5.42 se pretende observar el aspecto del material compuesto con una mayor cantidad de aserrín.

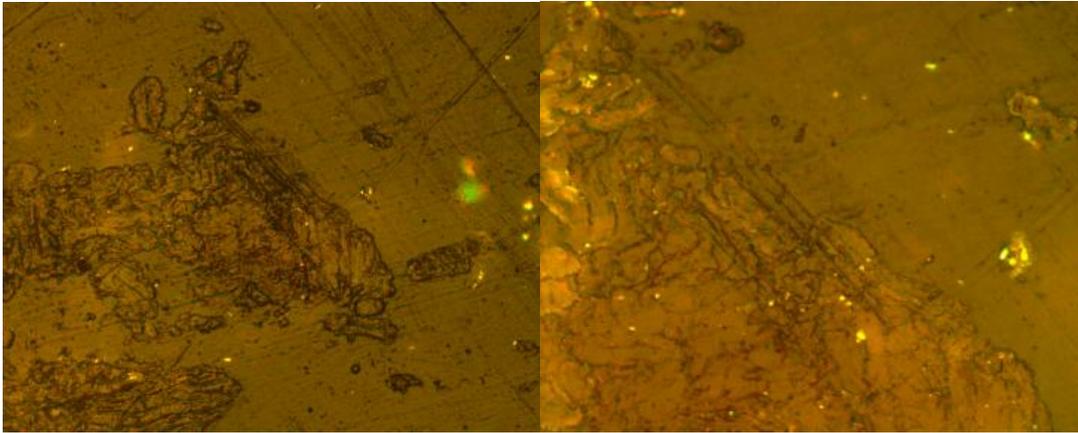


Fig. 5.42. Aspecto del Material compuesto PP-A, con 30% aserrín, aumentos de 20x, 50x. MO

En la figura 5.42 se observa una mayor cantidad de fibras que en su caso se están uniendo y ello indica que la distribución de éstas no es homogénea, lo cual puede interpretarse planteado que se genera un amontonamiento entre las partículas de aserrín. Lo que sigue presente es la unión de los dos materiales logrando plantear que esta adhesión es apropiada en cada una de las composiciones que se han observado. Algo importante es considerar que para este material compuesto PP - A, no existe ningún adhesivo, ni agente acoplante usado para promover la unión de ellos.

La figura 5.43 que se presenta a continuación corresponde a la composición de 40% de aserrín y 60% de polipropileno.

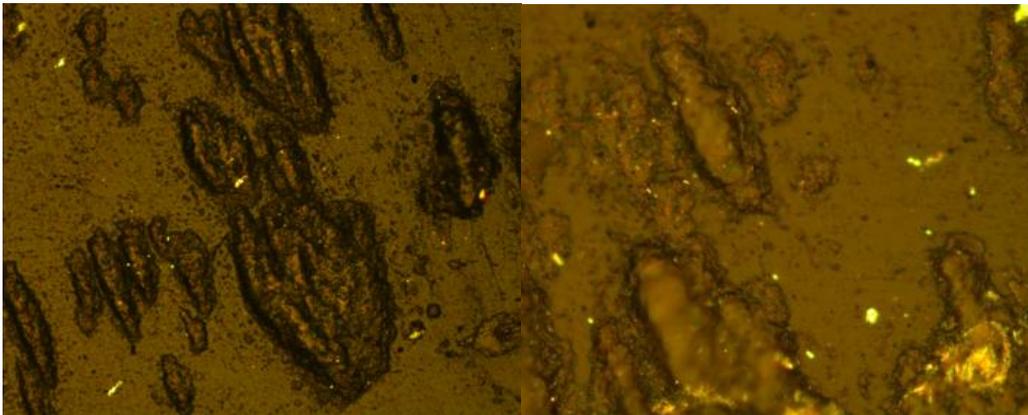


Fig. 5.43. Material compuesto PP-A con 40% aserrín, aumentos de 20x, 50x. MO.

En la figura de la izquierda resalta el hecho de que la cantidad de partículas de aserrín han aumentado y que hay una orientación preferente de dichas partículas, lo que se ha asociado a la trayectoria al momento de fluir con el plástico durante su procesamiento. Ello permite postular que se tiene un material que se comporta como ortotrópico, en el cual las fibras van en la dirección del flujo. También se encuentra que las fibras presentan dimensiones variadas, lo cual indica que para tener un mayor control en el material compuesto se deben controlar de forma más estricta las dimensiones de la fibra.

### 5.3.8.2. Microscopía Electrónica de barrido

En la figura 5.44 se muestra como se desarrolló la preparación de las probetas y la observación de la pieza en el microscopio para la obtención de resultados.

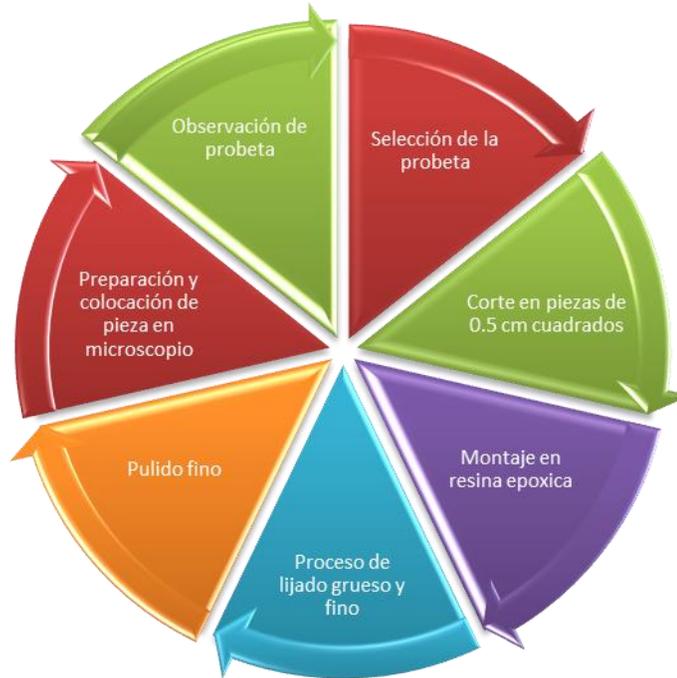


Fig. 5.44. Proceso para la observación con microscopio electrónico de barrido

Con esta figura 5.44 se indica que el proceso es cíclico y que permite tener repetitividad en las observaciones de cada una de las probetas ensayadas. En los siguientes párrafos y figuras se presentan la preparación y la observación por medio del microscopio electrónico de barrido.

Un paso importante para la microscopía electrónica de barrido (MEB) es la preparación adecuada de la probeta para su observación y en la figura 5.45 se muestra una pieza preparada para su observación.



Fig. 5.45. Probetas preparadas para su observación en el MEB.

La figura 5.45 muestra la forma en la cual se realiza la preparación de la probeta para su observación microscópica.

Para realizar la observación se utilizaron los siguientes parámetros:

- Voltaje de aceleración 20kV
- Aumentos de 200X y 800X
- Uso de Electrones retrodispersados (BSE).

En la figura 5.46 se muestra a detalle el aspecto de las partículas de aserrín, su morfología, indicios de su orientación y alguna evidencia de cómo se unen al polímero y como ello se refleja en la adherencia entre los dos componentes del material compuesto desarrollado, tomando como caso de ejemplo el que contiene 25% de aserrín. La orientación es semejante en las imágenes (a), (b), (c) y(d) lo que, como se ha mencionado antes, se considera asociado a la orientación generada previamente como producto del procesamiento mediante tecnologías de inyección y extrusión. Particularmente en las micrografías (b) y (c) se percibe una adherencia entre aserrín y PP reciclado.

Conviene reflexionar al respecto y las evidencias apuntarían a que, aparentemente, los esfuerzos y el flujo aplicados durante la elaboración de los materiales compuestos, son de orden suficiente como para provocar en el material compuesto, PP – Aserrín, una buena y suficiente adherencia entre matriz y refuerzo, de modo que aunque se genera una muy ligera pérdida de propiedades mecánicas, según lo dejan ver los resultados de los ensayos de tracción e impacto, es posible pensar en que este material compuesto PP-Aserrín, elaborado mediante estas tecnologías disponibles, puede conservar un adecuado nivel de propiedades, sin el uso de ningún aditivo, como para ser una opción viable para diversas aplicaciones, especialmente en el ámbito de las comunidades rurales, en razón de sus costos adecuados y con la característica adicional de que presenta la ventaja de dar uso a materiales reciclados.

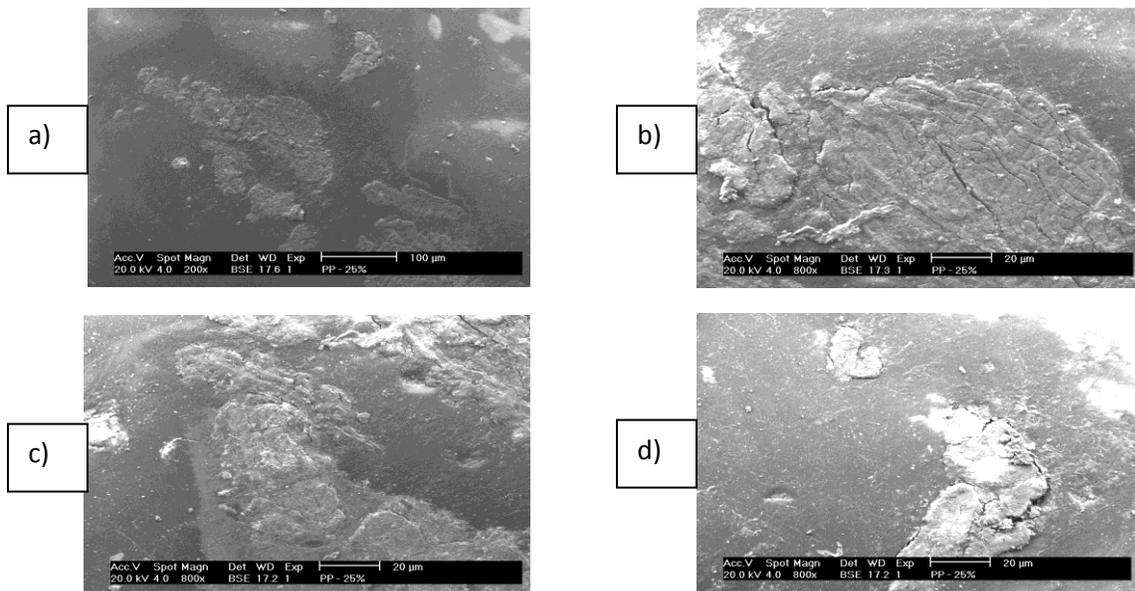


Fig. 5.46. Imágenes de microscopía electrónica de barrido del material compuesto PP-25 % Aserrín. BSE. 200 y 800 X.

Complementando lo anterior, la figura 5.47 muestra imágenes de la fractura del material compuesto PP - 20 % A, luego de los ensayos mecánicos aplicados, por medio del microscopio electrónico de barrido.

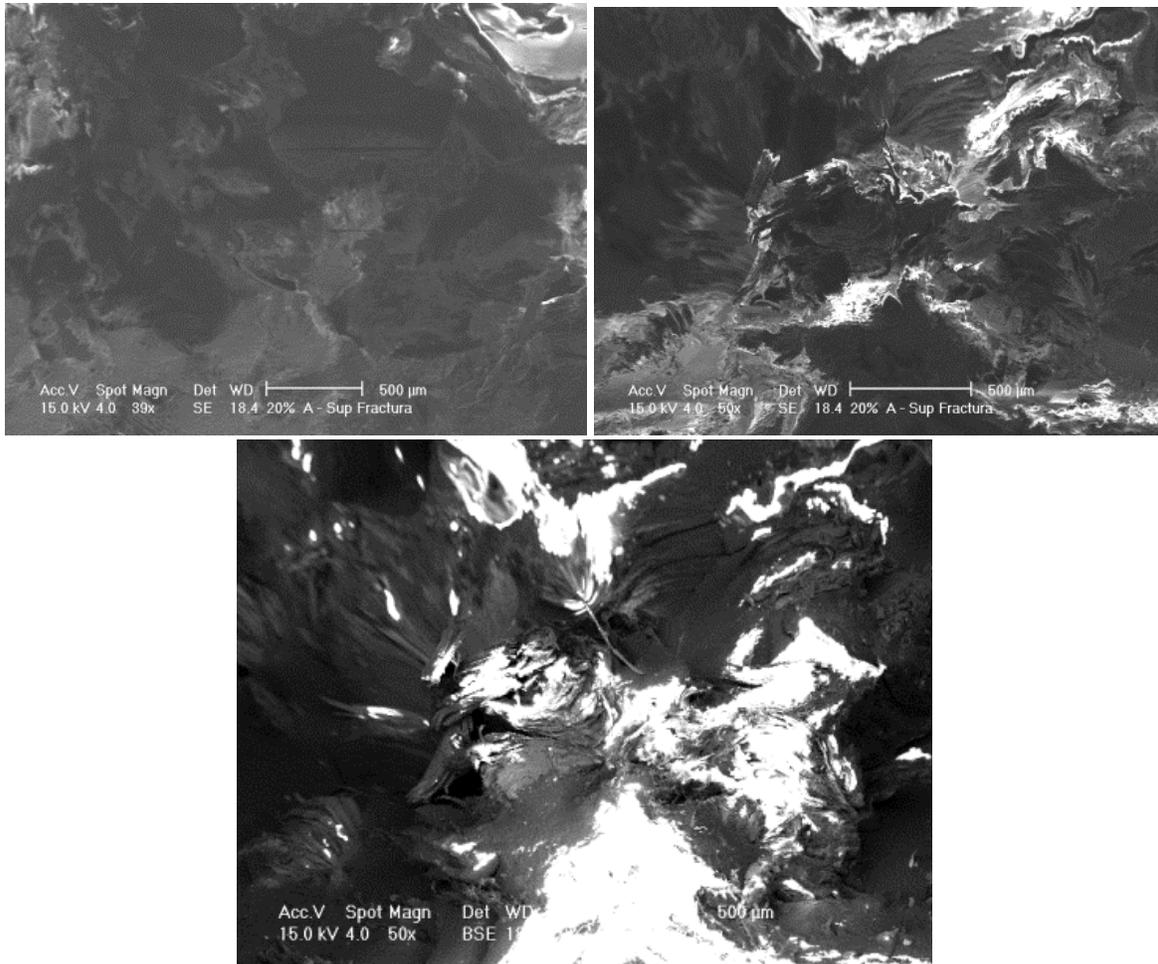


Fig. 5.47 Imágenes de la superficie de fractura del material compuesto PP- 20% A, luego de ser sometidas a ensayos de tracción e impacto, mediante microscopía electrónica de barrido

Para la observación de la fractura en el microscopio electrónico de barrido, se emplearon los siguientes parámetros:

- Voltaje de aceleración 15kV
- Aumentos de 25X, 39X y 50X
- Electrones retrodispersados

En relación a la fractura que se presenta en las probetas del material compuesto ocurre a través de la ruptura de las fibras de aserrín, con evidencias de algún nivel de fragilidad.

#### 5.4. Aspectos generales del análisis de resultados

La malla utilizada en el desarrollo del material compuesto con mayor concentración fue la 40 (0.425 mm de apertura entre los alambres de la malla). Se puede derivar de los resultados que se encuentran en la sección de análisis de resultados, que la pequeña disminución en los valores de la carga y el esfuerzo soportados, no se percibe que originen una afectación importante de la resistencia del material con la presencia del aserrín, lo que representa una tendencia semejante a la reportada en trabajos como

(Diporovic, Miljkovic y Dingova, 2006) (Moya, Poblete y Valenzuela, 2012), y coincide también con el planteamiento de Abbang Aadullah (2009), en la idea de dicha disminución puede estar asociada con la presencia de huecos e impurezas en los materiales reciclados.

En general, los resultados del ensayo de impacto, la tenacidad presentó ligeras variaciones, y conviene resaltar como la combinación 80%PP-20%aserrín, mostró un valor mayor de energía, respecto al resto. Un factor digno de mención es que en el caso de la probeta 70%PP-30%aserrín, que presentó la mayor porosidad observada, es la causa de la disminución de la tenacidad. Una reflexión al respecto es la de importancia de conseguir, a través de la extrusión y la inyección, una muestra sin poros.

Tabla 28. Datos comparativos del ensayo de impacto para material compuesto de plástico-madera por diversos autores. (Cai 2010, Miljkovic 2006, Bledzki 2006)

<b>Composición de material compuesto</b>	<b>Energía [kJ/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Autor de la investigación</b>
PP+40%A	15.36	González Sosa et al
PP+40%A	11.6	Zhiyong, Cai
PP+50%A(polvo)	16.78	Milanka,Diporovic
PP+50%A+5%PB	14.6	P. Nygard
PP+40%A	9	Andrej K.

Una comparación del ensayo de impacto permite observar que los resultados obtenidos en este trabajo son de niveles semejantes a los reportados en otras investigaciones, lo cual permite soportar la idea de este material como una posible materia prima para la elaboración de objetos de uso cotidiano.

De acuerdo a los resultados de los ensayos mecánicos aplicados, se percibe que las variaciones son relativamente pequeñas, de modo tal que se puede considerar que el material elaborado conserva un rango de propiedades mecánicas de suficiente nivel como para pensar en algunas aplicaciones, de tipo doméstico, del material compuesto generado.

En razón de las tecnologías de procesamiento empleadas, que son las habituales para un material plástico como el polipropileno (extrusión – inyección), y el hecho de que no se ha empleado ninguna clase de aditivos, la revisión conjunta de los resultados logrados, permite vislumbrar un material con posibilidades prometedoras para ser materia prima para la fabricación de elementos tales como pisos ó muebles interiores, que dé empleo y que permita que puedan hacerse de ese tipo de productos a personas de segmentos sociales que tengan recursos económicos reducidos.

A continuación se muestra la tabla 29 que hace referencia a los resultados obtenidos, después de realizar cálculos correspondientes, para la evaluación relacionada de forma directa con los costos de producción para el material virgen y el material compuesto desarrollado en este trabajo; lo cual permite recabar datos comparativos para futuras aplicaciones de los materiales mencionados (compuestos).

Tabla 29. Datos comparativos del costo para la fabricación de piezas con un volumen específico

Material	Cantidad de material kg	Cantidad de piezas fabricadas de $0.39 \times 10^{-3} \text{ m}^3$	Costo(\$)
PP <sub>100%</sub>	1	2900	\$52.40
MC <sub>PP60%-A40%</sub>	1	9100	\$23.70

Finalmente, la tabla 29 muestra datos relativos a la posible reducción de costo que se puede conseguir al emplear este tipo de material compuesto respecto al costo de su elaboración usando sólo polipropileno, aunque para una valoración completa es necesario realizar una evaluación que tome en cuenta factores como el acabado superficial de los elementos construidos y el sector al cual se dirigirían dichas piezas.

## 6. CONCLUSIONES

---

- Es recomendable que los materiales reciclados que se producen en el país, se consideraren para buscar su reutilización y con ello apoyar el entorno del mejoramiento ambiental vinculado directamente a la ingeniería.
- El postconsumo en materiales de tipo polimérico es un elemento a favor en este proyecto con beneficios en la reducción de costos al obtener el material compuesto desarrollado.
- Este trabajo promueve el aprovechamiento del aserrín de pino extraído de la madera que es el tipo que se utiliza más en este país permitiendo hacer atractivo su uso, como ya se había mencionado, para apoyar el medio ambiente y evitar que este material vaya directamente a los desechos.
- Es importante considerar algunos otros materiales plásticos para el desarrollo de nuevos compuestos, entre ellos el polietileno de alta y baja densidad y el PET.
- En este desarrollo se logró observar que al realizar la separación del aserrín las partículas de éste, de forma “fibrilar”, presentan un arreglo casi lineal y la geometría se conserva, en cuanto a sus dimensiones, en todas y cada una de las mallas.

- En el proceso de obtención de probetas del material compuesto por medio de tecnologías de transformación de plásticos, extrusión - inyección, es viable, con un adecuado control de los parámetros en la fabricación de éstas.
- Los tamaños del material de refuerzo que dan mejores resultados en la generación del material compuesto fueron los obtenidos con malla 30 y malla 40.
- Se llevó a cabo una caracterización mecánica y microestructural del material compuesto producido PP-A, con el principal propósito de obtener las propiedades suficientes, sobre todo de tipo mecánico, para aplicaciones destinadas a sectores rurales.
- De acuerdo a lo observado, el material compuesto muestra la adherencia entre matriz y refuerzo, particularmente a través de las observaciones en microscopio óptico y electrónico.
- De acuerdo a lo obtenido en este trabajo, se ha observado que los materiales compuestos (PP-Madera) tienen las siguientes características:
  - Una orientación “fibrilar” del aserrín, que se considera asociado a los procesos de transformación de plásticos empleados y la orientación final obedece a la forma en que se dio el flujo de dicho material.
- De los resultados que se logran con la caracterización mecánica se rescata la siguiente información, que se encuentra en la tabla 30.

Tabla 30. Resumen de los resultados obtenidos en el material compuesto generado

Material	Ensayo Tracción	Ensayo Impacto	Ensayo Dureza
PP (Virgen).	28[MPa]	16 [kJ/m <sup>2</sup> ]	74 Shore D
MC-PPA	22.65 [MPa]	15.4 [kJ/m <sup>2</sup> ]	75.9 Shore D
Variación porcentual	19.11 %	3.75 %	2.56 %

- El material compuesto muestra una mayor tenacidad cuando tiene la composición de 60% PP y 40% aserrín, de acuerdo a la evaluación del ensayo de impacto y su nivel es muy adecuado para pensar en diversas aplicaciones, ya que el material producido conserva una tenacidad semejante a la del material virgen.
- En cuanto a los ensayos de dureza, los resultados también muestran que el nivel de dureza, es del mismo orden del que presenta el polipropileno virgen, lo que se suma como otra característica que hace viable el uso del material compuesto generado.

- Con relación a los resultados del ensayo de tracción, si se observa una disminución en la resistencia del material compuesto respecto a la que presenta el PP virgen. Sin embargo, se considera que el nivel de resistencia que presenta el material compuesto fabricado, acompañado de un adecuado nivel de tenacidad, es una combinación atractiva para poder elaborar muebles y otros productos, que pueden ser destinados, en razón de su costo, posibilidades de procesamiento con tecnologías de procesamiento disponibles y del aprovechamiento de materiales reciclables, a las comunidades rurales.
- En la caracterización microestructural, se observó que la adherencia entre el plástico y la madera parece bastante razonable, tomando en cuenta que no se utilizó ninguna sustancia ni agente acoplante para intentar mejorar la unión de ambas materias primas.
- El análisis de la fractura realizado a las piezas de material compuesto muestra que se trata de una fractura frágil en la fibra, pero globalmente, en razón de la presencia de una fase polimérica de tipo dúctil, como se ha mostrado en el trabajo, conserva una tenacidad apropiada.

Por otro lado, la parte matemática en lo que es el análisis funcional, determina la importancia que se tiene al fundamentar la teoría y la experimentación con elementos matemáticos los cuales dan resultados óptimos para la elaboración de las probetas y la aplicación de los ensayos para verificar los resultados obtenidos.

En la tabla 31 se muestran las diferencias que se encontraron al realizar la evaluación matemática combinada con la experimental y su comparativa con el material virgen.

Tabla 31. Datos comparativos del modelo matemático con el material virgen

<b>Propiedad</b>	<b>Unidades</b>	<b>Modelo matemático</b>	<b>Valor material (virgen)</b>
<b>Modulo de elasticidad</b>	GPa	1.69-2.09	1.300
<b>Resistencia a la tracción</b>	MPa	22.93-25.73	33
<b>Dureza</b>	Shore D	73.84-76.16	73

Este desarrollo tecnológico ha permitido elaborar un material compuesto, amigable con el medio ambiente, con materiales de reuso, a través de una tecnología de procesamiento disponible y sencilla y ha producido un material de costo atractivo, con propiedades mecánicas suficientes para pensar en una serie de posibles aplicaciones y que puede cubrir un nicho de mercado, especialmente apropiado para sectores de bajos recursos y para productos de uso doméstico.

Con el desarrollo tecnológico generado con este trabajo de investigación, se ha logrado obtener un material compuesto de bajo costo y propiedades competitivas, con resultados atractivos en términos de resistencia mecánica y tenacidad, en base a la adición de aserrín, considerando que ambos materiales, refuerzo y matriz, son productos

reciclados y que los resultados obtenidos de los ensayos aplicados muestran una disminución de su resistencia en un porcentaje de 5-10%, comparando los resultados con los valores que se reportan en el material virgen.

Con las investigaciones realizadas hasta el momento se pretende, en un futuro, ampliar el panorama de los materiales compuestos generados con productos o materia prima, de origen reciclado. Una serie de factores que merecen estudios más profundos para futuros trabajos son los relativos a un estudio detallado de la geometría del aserrín que se utiliza en este compuesto para derivar de ello un mejor control y la posibilidad de predicción de propiedades del material compuesto, así como el posible efecto de la humedad, la incidencia de las condiciones hidrofóbicas e hidrofílicas de refuerzo matriz en las propiedades finales y la ampliación y evaluación de otros parámetros de operación tanto del proceso de extrusión como del de inyección del material compuesto.

El material compuesto con productos reciclados es una alternativa más para los materiales de nuevas generaciones que tienen propiedades semejantes a la de otros materiales plásticos con las ventajas de menores costos, propiedades competitivas y de manera más amigable con el medio ambiente.

Algunas de las aplicaciones que se pueden dar a este material compuesto en el rubro para la fabricación de muebles, elementos mecánicos como los son tornillos de sujeción, rejas, cabinas telefónicas, cimbras y productos que converjan con las propiedades obtenidas en la caracterización del material.

En futuras investigaciones se pretende seguir evaluando las composiciones obtenidas en este trabajo con otros parámetros de control como lo es la humedad, variedad de maderas, uso de agentes acoplantes alternativos ambientalmente amigables y de bajo costo, condiciones de procesamiento, geometría del refuerzo.

También es importante realizar control en los diferentes tamaños de partícula para el aserrín y controlar la longitud de la fibra con lo cual se esperan mejoras del material compuesto y en lo posible realizar la caracterización química, eléctrica, térmica para complementar las propiedades del material compuesto para cada una de las composiciones trabajadas en esta investigación y lograr su evaluación para aplicaciones en las diferentes ramas de la ingeniería.

Aplicaciones del material compuesto, realizando la comparativa con las propiedades mecánicas son: a) Tarimas de carga, b) Postes de plástico, c) Vallas de plástico, d) Perfiles para pisos, e) Señalizadores de obra, se consideran estos productos por las restricciones mecánicas que ofrecen y que se compara de forma homogénea con el material compuesto desarrollado en este trabajo de investigación.

## 7. PUBLICACIONES OBTENIDAS DURANTE EL DESARROLLO CON EL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

---

En este apartado se mencionan las publicaciones generadas a partir del trabajo de investigación, las cuales son presentados revistas indexadas y en congresos nacionales e internacionales.

### Revistas indexadas:

1. "Methodology for the obtaining in Materials Consisted of Plastic-Wood and its Characterization with the Hardness Test". International Journal of Engineering Innovation & Research Volume 2, Issue 4, ISSN:2277-5668, pp 314-318. Julio 2013
2. "Análisis Microscópico para un Material Compuesto de Productos Reciclados". Científica, vol. 16, núm. 2, abril-junio, 2012, pp. 83-90. Instituto Politécnico Nacional. Distrito Federal, México.

### Congresos:

1. "Materiales compuestos de plástico-madera y su caracterización con el ensayo de dureza", IV Congreso Nacional de Ciencia e Ingeniería de Materiales. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería. Febrero 2013
2. "Caracterización por medio del ensayo de tracción en materiales compuestos reciclados (PP-A)", XIII Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de sistemas. Instituto Politécnico Nacional. Sección de Estudios de Posgrado e Investigación. Unidad Zacatenco. Noviembre 2012

3. "Análisis microscópico para un material compuesto ", VI Congreso Internacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas. Instituto Politécnico Nacional. México D.F., Noviembre 2011
4. "Obtención de un material compuesto con materia prima reciclada y su evaluación con el ensayo de impacto", 4° Congreso Internacional de Ingenierías Mecánica, Eléctrica, Electrónica, Mecatrónica y Sistemas Computacionales, Santiago de Querétaro, Septiembre del 2011.
5. "Las matemáticas en la generación de materiales compuestos con productos reciclados", 4° Congreso Internacional de Ingenierías Mecánica, Eléctrica, Electrónica, Mecatrónica y Sistemas Computacionales. Santiago de Querétaro. Septiembre 2011.
6. "Comportamiento de un compuesto plástico reciclado-madera (aserrín) en el ensayo de tracción", XVI Congreso Internacional Anual de la SOMIM, Septiembre del 2010.
7. "Caracterización mecánica de un material compuesto plástico-madera, a partir de productos reciclados, por medio de ensayos de tracción", X Congreso Iberoamericano de Polímeros 2010
8. "La importancia de las matemáticas en el desarrollo de un material compuesto", SOMI XXIV Congreso de Instrumentación, Octubre 2010
9. "Desarrollo de un material compuesto plástico(PP)-madera (aserrín) usando materias primas de reuso", XIV Congreso Internacional Anual de la SOMIM, Septiembre 2008.
10. "Importancia de materiales compuestos (plástico-madera) en aplicaciones de ingeniería", IX Congreso Iberoamericano de Polímeros 2008.

#### Simposium

1. "Aprovechamiento de materiales reciclados para la obtención de compuestos en material plástico", Secretaria de Posgrado e Investigación Coordinación de Investigación, Abril 2009

Por otro lado, se desea agradecer a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM, el apoyo concedido a través del Proyecto PAPIIT IT102612 "Desarrollo de Tecnologías de Modificación Superficial para la Optimización del Rendimiento de Materiales", por el apoyo brindado en la realización de esta tesis.

## 8. REFERENCIAS

---

- [1] Adhikary, K. B. (2008). Dimensional stability and mechanical behaviour of wood-plastic composites based on recycled and virgin high-density polyethylene (HDPE). *Composites: Part B: Engineering*, 807-815.
- [2] Almaadeed, M. A. (2012). Date palm wood flour/glass fibre reinforced hybrid composites of recycled polypropylene: Mechanical and thermal properties. *Materials and Design*, 289-294.
- [3] Ashori, A. (2009). Characteristics of wood-fiber plastic composites made of recycled materials. *Waste Management*, 1291-1295.
- [4] Aurrekoetxea, J. (2008). Effects of microstructure on wear behaviour of wood reinforced polypropylene composite. *Wear*, 606-611.
- [5] Ayrimis, N. (2012). Effects of formulation variables on surface properties of wood plastic composites. *Composites: Part B*, 325-331.
- [6] Beg, M. (2008). Reprocessing of wood fibre reinforced polypropylene composites. Part I: Effects on physical and mechanical properties. *Composites: Part A*, 1091-1100.
- [7] Beg, M. (2008). Reprocessing of wood fibre reinforced polypropylene composites. Part II: Hygrothermal ageing and its effects. *Composites: Part A*, 1565-1571.
- [8] Bhattacharyya, D. (2003). Thermoforming of woodfibre-polypropylene composite sheets. *Composites Science and Technology*, 353-365.

- [9] Bledzki, A. K. (2004). Creep and impact properties of wood fibre-polypropylene composites: influence of temperature and moisture content. *Composites Science and Technology*, 693-700.
- [10] Bledzki, A. K. (2005). A comparison of compounding processes and wood type for woodfibre-PP composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 789-797.
- [11] Bledzki, A. K. (2006). Injection moulded microcellular wood fibre-polypropylene composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1358-1367.
- [12] Bledzki, A. K. (2010). Polypropylene composites with enzyme modified abaca fibre. *Composites Science and Technology*, 854-860.
- [13] Bouafif, H. (2009). Effects of fiber characteristics on the physical and mechanical properties of wood plastic composites. *Composites: Part A*, 1975-1981.
- [14] Bourmaund, A. (2011). What is the technical and environmental interest in reusing a recycled polypropylene-hemp fibre composite?. *Polymer Degradation and Stability*, 1732-1739.
- [15] Broutman. (2009). *Modern composite materials*. New York: Lawrence.
- [16] Butylina, S. (2012). A study of superface changes of wood-polypropylene composites as the result of exterior weathering. *Polymer Degradation and Stability*, 337-345.
- [17] Callister, W. D. (2009). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. México: Limusa Wiley.
- [18] Chun, K. S. (2013). Characterization and properties of recycled polypropylene/coconut shell powder composites: effect of sodium dodecyl sulfate modificaction. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 287-294.
- [19] Córdoba, C. (2010). Aprovechamiento de polipropileno y polietileno de alta densidad reciclados, reforzados con fibra vegetal, tetera (*Stromanthe stromathoides*). *Revista Iberoamericana de polímeros*, 417-427.
- [20] Cui, Y. (2008). Fabrication and interfacial modification of wood/recycled plastic composite materials. *Part A: Applied Science and Manufacturing*, 655-661.
- [21] Dányádi, L. (2010). Effects of various surface modifications of wood flour on the properties of PP/wood composites. *Composites: Part A*, 199-206.
- [22] Diez, G. (1988). *Materiales compuestos: tecnología de los plásticos reforzados*. Madrid: Fondo Editorial de Ingeniería Naval.
- [23] Espert, A. (2004). Comparison of water absorption in natural cellulosic fibres from wood and one-year crops in polypropylene composites and its influence on their

- mechanical properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1267-1276.
- [24] Fabiyi, J. s. (2008). Wood plastic composites weathering: Visual appearance and chemical changes. *Polymer Degradation and Stability*, 1405-1414.
- [25] G., T. (2007). Interfacial structure and properties of wood/polypropylene composites. *Forest Service*, 144-146.
- [26] García, M. (2009). Wood-plastics composites with better fire retardancy and durability performance. *Composites: Part A*, 1772-1776.
- [27] George, D. A. (2004). *Materials of construction wood, plastics, fabrics*. Toronto: Van Nostrand.
- [28] Gurdal, Z. (2005). *Design and optimization of laminated composite materials*. New York: Wiley.
- [29] Harper, D. (2002). Interaction between coupling agent and lubricants in Wood-polypropylene composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 385-394.
- [30] Hetzer, M. (2008). Wood/polymer/nanoclay composites, environmentally friendly sustainable technology: A review. *Chemical Engineering Research and Design*, 1083-1093.
- [31] Hoang., T. Q. (2010). Natural fiber-reinforced recycled polypropylene: microstructural and mechanical properties. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 209-219.
- [32] Hull, D. (1987). *Materiales compuestos*. Barcelona; México: Reverte.
- [33] Ichazo, M. N. (2001). Polypropylene/wood flour composites: treatments and properties. *Composite Structures*, 207-214.
- [34] Incarnato, L. (1999). Rheological and mechanical properties of recycled polypropylene. *Polymer Engineering & Sciencia*, 749-755.
- [35] Isaac M, O. I. (2006). *Engineering mechanics of composite materials*. New York: Oxford University.
- [36] Jie Guo, Y. T. (2010). Performance and thermal behavior of wood plastic composite produced by nonmetals of pulverized waste printed circuit boards. *Journal of Hazardous Materials*, 203-207.
- [37] Jördens, C. (2010). Investigation of the water absorption in polyamide and wood plastic composite by terahertz time-domain spectroscopy. *Polymer Testing*, 209-215.

- [38] K., K. A. (2006). *Mechanics of composite materials*. Florida: Taylor&Francis.
- [39] Karmarkar, A. (2007). Mechanical properties of wood-fiber reinforced polypropylene composites: Effects of a novel compatibilizer with isocyanate functional group. *Composites: Part A*, 227-233.
- [40] Kasem, H. (2010). Fiber-matrix unbonding and plastic deformation in C/C composites under tribological loading. *Wear*, 104-111.
- [41] Klyosov, A. A. (2007). *Wood-Plastic Composites*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- [42] Kuang, X. (2010). Mechanical properties and size stability of wheats straw and recycled LDPE composites coupled by waterborne coupling agents. *Carbohydrate Polymers*, 927-933.
- [43] Larrode, E. (2000). *Materiales compuestos*. Zaragoza: Miravete.
- [44] Lei, Y. (2010). Wood plastic composites based on microfibrillar blends of high density polyethylene/poly(ethylene terephthalate). *Bioresource Technology*, 3665-3671.
- [45] Leu, S.-Y. (2012). Optimized material composition to improve the physical and mechanical properties of extruded wood-plastic composites (WPCs). *Construction and Building Materials*, 120-127.
- [46] Li, L. (2013). Evaluation of the kinetic friction performance of modified wood decking products. *Construction and Building Materials*, 863-868.
- [47] Li, T. (2007). Mechanical properties of wood flour/HDPE/ionomer composites. *Composites: Part A*, 1-12.
- [48] Liber-Knec., A. (2006). Estimation of mechanical (static and dynamic) properties of recycled polypropylene filled with wood flour. *Polymer*, 571-575.
- [49] Londoño, L. S. (2009). Caracterización de los materiales plásticos reciclados provenientes de la industria bananera empleados para la elaboración de madera plástica. *Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 1453-1460.
- [50] López, J. (2012). PP composites based on mechanical pulp, deinked newspaper and jute strands: A comparative study. *Composites: Part B*, 1-9.
- [51] Lu, N. (2013). A comparative study of the mechanical properties of hemp fiber with virgin and recycled high density polyethylene matrix. *Composites: Part B*, 1651-1656.
- [52] Mantia, F. L. (2011). Green composites: A brief review. *Composites: Part A*, 579-588.
- [53] McHenry, E. (2003). Composite materials based on wood and nylon fibre. *Composites: Part A*, 171-181.

- [54] Mehat, N. M. (2011). Optimization of mechanical properties of recycled plastic products via optimal processing parameters using the Taguchi method. *Journal of Materials Processing Technology*, 1989-1994.
- [55] Migneault, S. (2009). Effects of processing method and fiber size on the structure and properties of wood-plastic composites. *Composites: Part A*, 80-85.
- [56] Nachtigall, S. M. (2007). New polymeric-coupling agent for polypropylene/wood-flour composites. *Polymer Testing*, 619-628.
- [57] Nazrul, M. (2010). Physico-mechanical properties of chemically treated coir reinforced polypropylene composites. *Composites: Part A*, 192-198.
- [58] Ndiaye, D. (2008). Durability of wood polymer composites: Part 1. Influence of wood on the photochemical properties. *Composites Science and Technology*, 2779-2784.
- [59] Ndlovu, S. (2013). LDPE-wood composites utilizing degraded LDPE as compatibilizer. *Composites: Part A*, 80-88.
- [60] Neagu, R. C. (2005). Influence of wood-fibre hygroexpansion on the dimensional instability of fibre mats and composites. *Composites: Part A*, 772-788.
- [61] Newell, J. (2011). *Ciencia de materiales, aplicaciones en ingeniería*. México: Alfaomega.
- [62] Nourbakhs, A. (2010). Wood plastic composites from agro-waste materials: Analysis of mechanical properties. *Bioresource Technology*, 2525-2528.
- [63] Nygård, P. (2008). Extrusion-based wood fibre-PP composites: Wood powder and pelletized wood fibres-a comparative study. *Composites Science and Technology*, 3418-3424.
- [64] Nzokou, P. (2006). Relationship between non destructive and static modulus of elasticity of commercial wood plastic composites. *European Journal of Wood and wood products*, 90-93.
- [65] Pecho, R. (2006). Influencia de la madera juvenil de pino radiata sobre las propiedades físicas y mecánicas de tableros OSB. *Bosque (Valdivia)*, 123-132.
- [66] Poléc, I. (2010). Die draw wood polymer composites. I. Mechanical properties. *Composites Science and Technology*, 45-52.
- [67] Reddy, C. R. (2010). Preparation and characterization of polypropylene-wheat straw-clay composites. *Composites Science and Technology*, 1674-1680.
- [68] Reis, J. (2013). Tensile behavior of post-consumer recycled high-density. *Polymer Testing*, 338-342.

- [69] Renner, K. (2009). Deformation and failure of PP composites reinforced with lignocellulosic fiber: Effects of inherent strength of the particles. *Composites Science and Technology*, 1653-1659.
- [70] Renner, K. (2010). Micromechanical deformation processes in PP/wood composites: Particle characteristics, adhesion, mechanisms. *Composites: Part A*, 1653-1661.
- [71] Renner, K. (2010). Micromechanical deformations in PP/lignocellulosic filler composites: Effect of matrix properties. *Composites science and Technology*, 1141-1147.
- [72] Sanjuan-Raygoza, R. (2009). Efecto de la fibra de agave de desecho en el reforzamiento de polipropileno virgen o reciclado. *revista Mexicana de Ingeniería Química*, 319-327.
- [73] Sobczak, L. (2012). Polypropylene composites with natural fibers and wood-general mechanical property profiles. *Composites science and Technology*, 550-557.
- [74] Stark, N. M. (2003). Effects of wood fiber characteristics on mechanical properties of wood/polypropylene composites. *Wood and Fiber Science*, 167-174.
- [75] Stephen, T. (2000). *Diseño y análisis de materiales compuestos*. España: Reverte.
- [76] Strömberg, E. (2009). The effect of biodegradation on surface and bulk property changes of polypropylene, recycled polypropylene and polylactide biocomposites. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 1045-1053.
- [77] Tomoyuki, F. (2002). Microscopic Study on the Composites of wood and polypropylene. *"Forest Research Institute Research Report"*, 115-122.
- [78] Umer, R. (2008). Modelling the application of wood fibre reinforcements within liquid composite moulding processes. *Composites: Part A*, 624-639.
- [79] V., V. (2001). *Mechanics and analysis of composite materials*. Amsterdam: Elsevier Science.
- [80] Valente, M. (2011). Hybrid recycled glass fiber/wood flour thermoplastic composites: Manufacturing and mechanical characterization. *Composites: Part A*, 649-657.
- [81] Vilaseca, F. (2010). Biocomposites from abaca strands and polypropylene. Part 1: Evaluation of the tensile properties. *Bioresource Technology*, 387-395.
- [82] Villablanca, C. M. (2012). Propiedades físicas y mecánicas de compuestos de polietileno reciclado y harinas de corteza y madera de pinus radiata fabricados mediante moldeo por inyección. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 13-29.
- [83] Wawrzynczyk, A. (1993). *Introducción al Análisis Funcional*. México: Universidad Autónoma Metropolitana.

- [84] Xu, X. (2008). Life cycle assessment of wool-fibre-reinforced polypropylene composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 168-177.
- [85] Yeh, S.-K. (2008). Improved wood-plastic composites through better processing. *Composites: Part A*, 1694-1699.
- [86] Yeh, S.-K. (2009). Wood-plastic composites formulated with virgin and recycled ABS. *Composites Science and Technology*, 2225-2230.
- [87] Zafeiropoulos, N. (2012). Engineering and characterisation of the interface in flax fibre/polypropylene composite materials. Part I. Development and investigation of surface treatments. *Composites. Part A. Applied Science and Manufacturing*, 1083-1093.
- [88] Zou, Y. (2010). Lightweight composites from long wheat straw and polypropylene web. *Bioresource Technology*, 2026-2033.

## 9. ANEXOS

---

Bases de datos en la experimentación por medio del ensayo de tracción.

	<b>ENSAYOS REALIZADOS EL DÍA 06 DE MARZO DEL 2010</b>			
	ENSAYO DE TRACCIÓN PARA PROBETAS DE MATERIAL RECICLADO PP Y COMPUESTO PP-ASERRÍN			
	POLIPROPILENO RECICLADO GRIS			
CARGA	DESPLAZAMIENTO	ESFUERZO	MODULO DE ELASTICIDAD	DEFORMACION
1.289	9.46E-03	29.3	3.15E-02	1.58E-04
1.345	9.90E-03	30.58	3.15E-02	1.65E-04
1.329	9.71E-03	30.21	3.15E-02	1.62E-04
1.345	9.97E-03	30.58	3.15E-02	1.66E-04
1.361	9.55E-03	30.94	3.15E-02	1.59E-04
	POLIPROPILENO RECICLADO DORADO			
	DESPLAZAMIENTO	ESFUERZO	MODULO DE ELASTICIDAD	DEFORMACION
CARGA	9.48E+00	32.03	3.29E-02	1.58E-01
1.409	9.11E+00	32.49	3.29E-02	1.52E-01
1.429	7.75E+00	32.03	3.29E-02	1.29E-01
1.409	8.79E+00	32.96	3.29E-02	1.47E-01
1.45	9.41E+00	32.03	3.29E-02	1.57E-01

1.409				
	POLIPROPILENO RECICLADO NEGRO			
CARGA	DESPLAZAMIENTO	ESFUERZO	MODULO DE ELASTICIDAD	DEFORMACION
1.172	6.85E+00	26.64	1.47E-01	1.14E-01
1.119	4.93E+00	25.44	2.09E-02	8.22E-02
1.087	8.59E+00	24.71	3.00E-03	1.43E-01
1.083	4.57E+00	24.62	7.10E-03	7.62E-02
1.107	8.53E+00	25.17	7.94E-02	1.42E-01
	POLIPROPILENO NEGRO 50%ASERRIN-MALLA20			
CARGA	DESPLAZAMIENTO	ESFUERZO	MODULO DE ELASTICIDAD	DEFORMACION
0.5798	1.75E+00	13.18	2.00E-04	2.92E-02
0.7409	2.50E+00	16.86	2.22E-02	4.17E-02
0.5678	1.79E+00	12.91	5.30E-03	2.98E-02
0.8013	2.57E+00	18.22	7.66E-02	4.28E-02
0.6402	1.85E+00	14.55	0.00E+00	3.08E-02
	POLIPROPILENO NEGRO 45%ASERRIN-MALLA20			
CARGA	DESPLAZAMIENTO	ESFUERZO	MODULO DE ELASTICIDAD	DEFORMACION
0.7127	2.42E+00	16.2	0.00E+00	4.03E-02
0.753	2.53E+00	17.12	1.82E-02	4.22E-02
0.8174	3.04E+00	18.58	1.37E-02	5.07E-02
0.6523	1.77E+00	14.83	0.00E+00	2.95E-02
0.7651	2.38E+00	17.39	6.00E-04	3.97E-02
	POLIPROPILENO NEGRO 40%ASERRIN-MALLA20			
CARGA	DESPLAZAMIENTO	ESFUERZO	MODULO DE ELASTICIDAD	DEFORMACION
0.757	2.40E+00	17.21	2.94E-02	4.00E-02
0.7772	2.59E+00	17.67	6.84E-02	4.32E-02
0.8094	2.83E+00	18.4	0.00E+00	4.72E-02
0.6362	2.05E+00	14.46	7.39E-02	3.42E-02
0.753	2.29E+00	17.12	0.00E+00	3.82E-02
	POLIPROPILENO DORADO 55%ASERRIN-MALLA30			

CARGA	DESPLAZAMIENTO	ESFUERZO	MODULO DE ELASTICIDAD	DEFORMACION
0.8617	2.93E+00	19.59	5.14E-02	4.88E-02
0.9141	2.90E+00	20.78	2.13E-02	4.83E-02
0.7973	2.61E+00	18.13	0.00E+00	4.35E-02
0.8617	3.13E+00	19.59	1.20E-02	5.22E-02
0.8335	2.83E+00	18.95	0.00E+00	4.72E-02
POLIPROPILENO DORADO 45%ASERRIN-MALLA30				
CARGA	DESPLAZAMIENTO	ESFUERZO	MODULO DE ELASTICIDAD	DEFORMACION
1.019	3.82E+00	23.16	0.00E+00	6.37E-02
0.8899	2.90E+00	20.23	5.00E-03	4.83E-02
0.8657	3.16E+00	19.68	2.39E-02	5.27E-02
0.7892	2.37E+00	17.94	9.00E-04	3.95E-02
0.91	2.90E+00	20.69	1.77E-02	4.83E-02
POLIPROPILENO DORADO 40%ASERRIN-MALLA30				
CARGA	DESPLAZAMIENTO	ESFUERZO	MODULO DE ELASTICIDAD	DEFORMACION
0.9302	3.55E+00	21.15	2.40E-02	5.92E-02
1.043	3.87E+00	23.71	5.76E-02	6.45E-02
0.9785	3.29E+00	22.24	7.12E-02	5.48E-02
1.023	3.74E+00	23.26	7.24E-02	6.23E-02
0.9503	3.47E+00	21.6	2.83E-02	5.78E-02
POLIPROPILENO PLATEADO 50%ASERRIN-MALLA40				
CARGA	DESPLAZAMIENTO	ESFUERZO	MODULO DE ELASTICIDAD	DEFORMACION
0.8255	3.30E+00	18.77	8.90E-03	5.50E-02
0.8657	3.17E+00	19.68	6.63E-02	5.28E-02
0.8698	3.75E+00	19.77	1.82E-02	6.25E-02
0.8094	2.66E+00	18.4	5.00E-04	4.43E-02
0.8899	3.20E+00	20.23	3.45E-02	5.33E-02
POLIPROPILENO PLATEADO 45%ASERRIN-MALLA40				

CARGA	DESPLAZAMIENTO	ESFUERZO	MODULO DE ELASTICIDAD	DEFORMACION
0.8738	3.30E+00	19.86	3.25E-02	5.50E-02
0.7973	2.40E+00	18.13	0.00E+00	4.00E-02
0.8657	2.93E+00	19.68	0.00E+00	4.88E-02
0.8939	3.38E+00	20.32	1.63E-02	5.63E-02
0.9785	3.95E+00	22.24	1.91E-02	6.58E-02
	POLIPROPILENO PLATEADO 40%ASERRIN-MALLA40			
CARGA	DESPLAZAMIENTO	ESFUERZO	MODULO DE ELASTICIDAD	DEFORMACION
0.9825	4.87E+00	22.34	0.00E+00	8.12E-02
0.9261	3.98E+00	21.05	2.23E-02	6.63E-02
1.015	5.04E+00	23.07	4.30E-03	8.40E-02
0.9423	3.01E+00	21.42	0.00E+00	5.02E-02
1.115	4.89E+00	25.35	2.28E-01	8.15E-02