

Desarrollo de materiales compuestos a partir de residuos maderables y plástico reciclado
para la fabricación de muebles en la empresa Arte Metálico AJP

Laura Daniela Pinzón Páez y Andrés Julián Torres Neira

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniería Química

Trabajo de investigación

Director

María Inés Jaramillo Gutiérrez

Ing. Química, PhD. Ingeniería Química

Codirector

Julio Andrés Pedraza Avella

Ing. Químico, PhD. Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2022

Agradecimientos

Inicialmente quiero agradecer a Dios, por siempre guiar e iluminar mi camino. Agradezco a mis padres, a mi madre María Páez, por todas esas velitas que prendió a la virgen María por mí, a padre Antonio Pinzón, por ayudarme a ser constante, apoyarme y enseñarme el valor que tiene nuestra empresa familiar Arte Metálico AJP.

A mi hermano Toñito, por acompañarme, apoyarme y cuidarme siempre. A Linda por todas las noches en las que trasnochó a mis pies. Esto es por y para ustedes familia, gracias por hacerlo posible.

Agradezco a Andrés que es no solo mi compañero de proyecto y futuro colega; si no un amigo incondicional que me dejó esta etapa de mi vida.

A nuestra directora, María Inés Jaramillo y codirector Julio Andrés Pedraza, por sus conocimientos y apoyo a lo largo del desarrollo de este proyecto. Al grupo de Tecno parque Nodo Bucaramanga, por compartirnos sus instalaciones y experiencia en ayuda de nuestro proyecto. A Wilson Carreño y Eduardo Carreño, técnicos del laboratorio de procesos y Joaquín Orozco, químico del laboratorio de la Escuela de Ingeniería Química por su colaboración y acompañamiento.

Finalmente, agradezco a la Daniela con muchos nervios y dudas del 2017, por no rendirse, por levantarse las veces que fuera necesario, por limpiar sus lágrimas y confiar en ella, hoy le puedo decir ¡lo logramos!, siempre has podido y siempre podrás.

Laura Daniela Pinzón Páez

Agradecimientos

Agradezco primero que todo a Dios por ser mi guía, mi apoyo y mi fortaleza en este camino; De igual manera y muy especialmente agradezco a mi madre Ruth Yolanda y padre Jose Luis por estar siempre a mi lado velando cada día por mi bienestar, por brindarme su sabiduría y ese apoyo incondicional que siempre los ha caracterizado, gracias por todo lo que inculcaron en mí, aquellos buenos valores, disciplina y actitudes que hoy en día me permiten destacar y lograr cumplir mis metas.

Agradezco a mis hermanos Yessica y Sebastián por el apoyo y la confianza que tuvieron en mí.

Agradezco a Laura por hacer parte de este momento de mi vida, por su amistad, cariño y bonitas experiencias compartidas.

Agradezco A nuestra directora, María Inés Jaramillo y codirector Julio Andrés Pedraza, por su apoyo a lo largo del desarrollo de este proyecto. Al grupo de Tecno parque Nodo Bucaramanga, por brindarnos sus instalaciones y experiencia en la ejecución de nuestro proyecto. A Wilson Carreño y Eduardo Carreño, técnicos del laboratorio de procesos y Joaquín Orozco, químico del laboratorio de la Escuela de Ingeniería Química por su colaboración y acompañamiento.

Finalmente, agradezco a la Universidad Industrial de Santander por la formación académica impartida en estos años de carrera y a todos mis familiares, amigos que estuvieron a mi lado en este camino.

Andrés Julián Torres Neira

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Objetivos	13
1.1. Objetivo General.....	13
1.2. Objetivos Específicos.....	13
2. Marco conceptual.....	14
2.1. Aserrín.....	14
2.2. Poliétileno de alta densidad	15
2.3. Material compuesto.....	16
2.3.1. Materiales compuestos de matriz polimérica (PMC).....	16
2.3.2. Compuestos reforzados por fibras.....	16
2.4. Estructura Sándwich en materiales compuestos	17
3.Estado del arte.....	18
4.Metodología.....	20
Etapa 1. Recolección y análisis de materias primas.	21
Actividad 1.1 recolección de plástico y aserrín.	21
Actividad 1.2 Acondicionamiento del plástico y aserrín.	21
Actividad 1.3 Análisis de caracterización del plástico y aserrín.	22
Etapa 2. Diseño de experimentos.....	23
Etapa 3. Elaboración de probetas.....	24
Etapa 4. Caracterización mecánica.	24
Actividad 4.1 Ensayo de tensión.....	24

MATERIAL COMPUESTO A PARTIR DE PEAD Y ASERRÍN.	5
Actividad 4.2 Ensayo de impacto.	24
Actividad 4.3 Ensayo de Dureza.	25
Actividad 4.4 Selección de la proporción con mejores resultados.	25
Actividad 4.5 Análisis de microscopia electrónica de barrido (SEM).	25
Actividad 4.6 Prueba de estabilidad.	26
Etapa 5. Elaboración del prototipo de mobiliario para la empresa Arte Metálico AJP. ...	26
5.Resultados	27
5.1. Recolección y análisis de materias primas.....	27
5.2. Diseño de experimentos	32
5.3. Caracterización mecánica	33
5.4. Elaboración del prototipo de mobiliario para la empresa Arte Metálico AJP.	42
6. Conclusiones	44
7. Recomendaciones	45
Referencias Bibliográficas	46
Apéndice	50

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Propiedades mecánicas del cedro (Cedrela odorata)	14
Tabla 2. Propiedades mecánicas de flor morada (Tabebuia impetiginosa).....	15
Tabla 3. Propiedades del Polietileno de alta densidad.....	16
Tabla 4. Diseño experimental.	33
Tabla 5. Porcentaje de elongación del material compuesto en el ensayo de tensión.	34
Tabla 6. Resistencia a la tracción del material compuesto en el ensayo de tensión.	34
Tabla 7. Resistencia al impacto el material compuesto en el ensayo de impacto.....	35
Tabla 8. Porcentaje de dureza del material compuesto en el ensayo de dureza.....	36
Tabla 9. Ponderación de resultados.....	36
Tabla 10. Micrografía en sección transversal de probetas del ensayo de impacto a 30x, 200x y 600x para cada proporción de estudio.	38
Tabla 11. Micrografía en sección transversal de probetas del ensayo de tensión a 30x, 200x y 600x para cada proporción de estudio.	40
Tabla 12. Prueba de estabilidad	42

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Estructura tipo sándwich	18
Figura 2. Etapas del proyecto.	21
Figura 3. Granulometría del aserrín.....	28
Figura 4. Granulometría del material polimérico.	29
Figura 5. Análisis termogravimétrico (TGA) del plástico.	30
Figura 6. Análisis termogravimétrico (TGA) del aserrín.	31
Figura 7. Calorimetría diferencial de barrido (DSC) del plástico.....	32
Figura 8. Prototipo final del escaño escalar y mesa auxiliar usando el panel del material compuesto realizado con la proporción 85:15.	43

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Método de cálculo para lo ensayos de tensión e impacto	50
Apéndice B . Evidencia de recolección y acondicionamiento de la Etapa 1.	52
Apéndice C. Planos de las probetas según la norma ASTM D.....	54
Apéndice D. Ensayos realizados para la elaboración del diseño de experimentos.	56
Apéndice E. Probetas fracturas en los ensayos mecánicos.	57
Apéndice F. Etapas de elaboración del panel usado en el escaño Escalar.....	58

Resumen

Título: Desarrollo de materiales compuestos a partir de residuos maderables y plástico reciclado para la fabricación de muebles en la empresa Arte Metálico AJP*

Autor: Laura Daniela Pinzón Páez, Andrés Julián Torres Neira**

Palabras Clave: Material compuesto, Polietileno de alta densidad, Aserrín.

Descripción

Este trabajo de investigación tiene como objetivo desarrollar un compuesto de matriz polimérica reforzado con fibras de aserrín para la elaboración de muebles en la empresa Arte Metálico AJP. La metodología empleada en el proceso partió desde la recolección y caracterización de las materias primas hasta la obtención de las probetas según las normas ASTM D para cada ensayo mecánico y el prototipo de escaño para su comercialización. Se caracterizaron las propiedades fisicoquímicas y granulométricas de la materia prima por termogravimetría y calorimetría diferencial de barrido, con los cuales se pudo establecer la única presencia de polietileno de alta densidad (PEAD) y así mismo, el rango de operación permisible de temperatura siendo este desde 133 °C hasta 180 °C, evitando la degradación del aserrín y la fusión del plástico.

El compuesto se obtuvo mediante el prensado en caliente a una temperatura de 180 °C, 3MPa de presión durante 15 minutos, con contenido del 15%, 20%, 25% de aserrín para sus posteriores análisis mecánicos y morfológicos. Los ensayos mecánicos de impacto, dureza y tensión obtenidos mostraban un incremento a medida que disminuía el porcentaje de aserrín, dejando en evidencia la proporción con mejores resultados es 85% PEAD y 15% aserrín, obteniendo una resistencia al impacto de 4263 J/m², dureza Shore D 52, resistencia a la tracción de 0.873 MPa con un porcentaje de elongación de 4.5%.

Mediante el análisis por microscopia electrónica de barrido se evidenció la buena distribución y acoplamiento de las materias primas. Se realizó la prueba de estabilidad del material sometidas a condiciones de intemperie de la ciudad de Bucaramanga, con una temperatura de 33.8 °C y una humedad relativa de 89%, lo cual permitió establecer el uso apropiado del material enfocado a la línea de exteriores de la empresa Arte Metálico AJP.

*Trabajo de grado.

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: María Inés Jaramillo Gutiérrez. Ingeniera Química, PhD. Codirector: Julio Andrés Pedraza Avella. Ingeniero Químico, PhD.

Abstract

Title: Development of composite materials from waste and recycled plastic for the manufacture of furniture in the company Arte Metálico AJP*

Author(s): Laura Daniela Pinzón Páez, Andrés Julián Torres Neira**

Key Words: Composite material, High density polyethylene, Sawdust.

Description:

This research work aims to develop a polymer matrix compound reinforced with sawdust fibers for the manufacture of furniture in the company Arte Metálico AJP. The methodology used in the process started from the collection and characterization of the raw materials to the obtaining of the specimens according to ASTM D standards for each mechanical test and the prototype of a seat for its commercialization. The physicochemical and granulometric properties of the raw material were characterized by thermogravimetry and differential scanning calorimetry, with which the only presence of high density polyethylene (HDPE) could be established and likewise, the permissible operating range of temperature being this from 133 °C to 180 °C, avoiding the degradation of sawdust and the melting of plastic.

The compound was obtained by hot pressing at a temperature of 180 °C, 3MPa of pressure for 15 minutes, with content of 15%, 20%, 25% sawdust for subsequent mechanical and morphological analysis. The mechanical tests of impact, hardness and tension obtained showed an increase as the percentage of sawdust decreased, leaving in evidence the proportion with the best results is 85% HDPE and 15% sawdust, obtaining an impact resistance of 4263 J / m², Shore D 52 hardness, tensile strength of 0.873 MPa with an elongation percentage of 4.5%.

Through the analysis by scanning electron microscopy, the good distribution and coupling of the raw materials was evidenced. The stability test of the material subjected to weather conditions in the city of Bucaramanga was carried out, with a temperature of 33.8 °C and a relative humidity of 89%, which allowed to establish the appropriate use of the material focused on the exterior line of the company Arte Metálico AJP.

*Bachelor thesis.

**Physicochemical Engineering Faculty. Chemical Engineering School. Director: María Inés Jaramillo Gutiérrez. Chemical Engineer, PhD. Codirector: Julio Andrés Pedraza Avella. Chemical Engineer, PhD.

Introducción

La contaminación medioambiental es uno de los mayores problemas que existen en la actualidad, el cual está ligado al desarrollo industrial y crecimiento de la población mundial. Los residuos sólidos (plásticos, textiles, metales, madera, escombros, etc.) son de especial preocupación porque se producen en grandes cantidades. Los plásticos presentes en los residuos sólidos son mayoritariamente polietileno (PE) y polipropileno (PP) (alrededor del 60%) y en menor proporción están el poliestireno (PS), cloruro de polivinilo (PVC), tereftalato de polietileno (PET), poliestireno-butadieno (PS-BD), poli (metacrilato de metilo) (PMMA) (Arandes et al., 2004). Particularmente, los plásticos no tienen la propiedad de degradarse fácilmente, afectando así tanto el ambiente urbano como en el rural.

Ante esta situación y la creciente acumulación de residuos en rellenos sanitarios, en Colombia ha crecido el interés por reciclar, disminuir la contaminación e interiorizar los principios de la economía circular en las organizaciones (Blanco, 2018). En la actualidad Colombia solo recicla el 16.5% de las más de 12 millones de toneladas de residuos que produce anualmente (Semana, 2021) y del cual, el 1.25% representa el reciclado únicamente de residuo plásticos. (Encuesta ambiental industrial, EAI, 2020). Pero, no solo los residuos plásticos están siendo desaprovechados, sino también los residuos madereros. Hoy en día, se recicla cerca del 84.9% (DANE, 2020) del total de los residuos madereros generados; Sin embargo, desde el año 2012 se estima que el 70% de madera generada es destinada a procesos de combustión y tan solo el 30% restante se destina a procesos industriales empleándose como madera aserrada, pulpa y papel, paneles y tableros y otros usos (López Chalarca, et al., 2019). De estos residuos el aserrín puede ser usado en diversos materiales debido a su capacidad de soportar cargas considerables, antes de sufrir una deformación.

En Colombia muchas empresas están interesadas en aplicar los principios de la economía circular, haciendo que sus residuos retornen nuevamente a su cadena productiva. Este es el caso de la empresa Arte Metálico AJP, una empresa santandereana dedicada a la fabricación de muebles metálicos y madereros desde 1995. Dentro de sus líneas principales de producción se encuentran los mobiliarios a base de madera, por esto el aserrín es un residuo generado en grandes volúmenes. Se estima que en esta empresa se producen cerca de 8 bultos de aserrín mensualmente, el cual está siendo entregado a terceros para su disposición final sin ningún tipo de remuneración. Por otra parte, la empresa cuenta con más de 25 empleados distribuidos en cinco sedes, en cada sede se tienen puntos de recolección de plástico de un solo uso. En este sentido, la empresa cuenta con dos fuentes de residuos a los cuales requiere darle un valor agregado.

De lo anterior surge la oportunidad de aprovechar los residuos generados en la empresa Arte Metálico AJP, proponiendo el desarrollo de un material compuesto de matriz polimérica reforzada con aserrín de madera, cumpliendo con las propiedades mecánicas requeridas para la elaboración de paneles destinados a la fabricación de mobiliarios sostenibles y amigables con el medio ambiente. Con este estudio se busca evaluar la posibilidad de abrir una nueva línea de producción paralela a las líneas tradicionales de muebles metálicos y madereros.

1. Objetivos

1.1.Objetivo General

Desarrollar un material de matriz polimérica reforzada con aserrín de madera cuyas propiedades mecánicas permitan su aplicación en la fabricación de muebles para la empresa Arte Metálico AJP.

1.2.Objetivos Específicos

Identificar las propiedades fisicoquímicas y granulométricas de las materias primas a emplear en la elaboración del material compuesto de plástico reciclado y aserrín de madera.

Determinar la proporción y distribución plástico-aserrín de madera en el material compuesto de matriz polimérica reforzada con aserrín, elaborado por prensado con calentamiento a condiciones constantes.

Caracterizar las propiedades mecánicas y morfológicas del material compuesto de matriz polimérica reforzada con aserrín para evaluar la pertinencia de su uso en la empresa Arte metálico AJP.

2. Marco conceptual

2.1. Aserrín

El aserrín es un residuo generado a partir del corte por sierra de la madera, el cual es emanado de ella mientras se desarrolla el aserrado. (Serret Guasch. Nurian, 2016) Se diferencia de otros residuos maderables como la viruta, ya que esta es una hoja sacada mediante la acción de un cepillo o de otro tipo de implemento y su particularidad es que suele salir arrollada en forma espiral; Así mismo se diferencia de una astilla, la cual es un fragmento largo y con punta que se desprende cuando la madera se rompe. (¿Qué es una astilla de madera?, 2017)

Dentro de los tipos de madera empleados en el proceso de fabricación de muebles en Arte Metálico AJP en su actividad productiva, se tiene la madera de cedro y flor morada, las cuales poseen las características mecánicas resumidas en las Tabla 1 y 2, respectivamente.

Tabla 1.

Propiedades mecánicas del cedro (Cedrela odorata)

Propiedad	Unidades	Valor
Módulo de elasticidad en flexión	kg/cm ²	89.70
Módulo de ruptura en flexión	kg /cm ²	436
Dureza	kg /cm ²	253.4
Resistencia impacto	kg /cm ²	1.30

Nota. Adaptado de (Burgos Enriquez et al., 2019)

Tabla 2.*Propiedades mecánicas de flor morada (Tabebuia impetiginosa)*

Propiedad	Unidades	Valor
Resistencia compresión	N/mm ²	53
Resistencia flexión	N/mm ²	106
Módulo de elasticidad	N/mm ²	9.79
Resistencia al impacto	kJ/m ²	78
Dureza	N/mm ²	28

Nota. Adaptado de (Hans G. Richter et al., 2012)

2.2. Polietileno de alta densidad

El polietileno de alta densidad (PEAD) es un polímero termoplástico el cual, al calentarse a determinadas temperaturas se convierte en fluido, permitiendo su maleabilidad en la forma deseada, quedando preservada al enfriarse; El PEAD se obtiene por medio de la polimerización del etileno. Sus moléculas apenas presentan ramificaciones, lo que le confiere una densidad molecular considerable, que se traduce en una gran resistencia y dureza, así como una mayor tolerancia a las altas temperaturas. Esta característica es, a su vez, la principal diferencia entre el polietileno de alta densidad y el de baja densidad. (Polietileno de alta densidad, 2021). Las características mecánicas resumidas del PEAD se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3.*Propiedades del Polietileno de alta densidad*

Propiedad	Unidades	Valor
Módulo de elasticidad	N/mm ²	850-1200
Resistencia a la tracción	N/mm ²	28-31.70
Impacto	kJ/m ²	50
Dureza	Shore D	66-70

Nota. Adaptado de (Polietileno-HDPE, s. f.)

2.3. Material compuesto

Se define como la combinación de dos o más materiales a partir de una unión química o no química. Estos materiales que forman el compuesto poseen propiedades mejores que las que presentan los materiales componentes por si solos.

Los componentes del material compuesto no deben disolverse ni fusionarse completamente entre ellos, es decir, los materiales deben poderse identificar por medios físicos, ya que son heterogéneos. (Composites, s. f.)

2.3.1. Materiales compuestos de matriz polimérica (PMC)

Son materiales con buenas propiedades mecánicas, resistentes a la corrosión y a los agentes químicos, y a causa de sus propiedades físicas, pueden ser moldeados con absoluta libertad de formas. (Composites, s. f.)

2.3.2. Compuestos reforzados por fibras

Los materiales reforzados por fibras son los más importantes desde el punto de vista tecnológico. El objetivo es conseguir materiales con una elevada resistencia a la fatiga y rigidez, a

bajas y altas temperaturas, y simultáneamente una baja densidad, por lo que se pretende conseguir una mejor relación resistencia-peso. Esta relación se consigue empleando materiales ligeros tanto en la matriz como en las fibras, siempre que estas cumplan con las propiedades mecánicas que se quieren otorgar al compuesto. (Composites, s. f.)

2.4. Estructura sándwich en materiales compuestos

La estructura tipo sándwich consiste en dos placas relativamente delgadas, pegadas y separadas por un núcleo como se muestra en la Figura 1. Los revestimientos o pieles se definen como los laminados que encierran el núcleo, que en el caso del presente proyecto serían placas formadas por el material reciclado PEAD. El núcleo se puede definir como aquel elemento de baja densidad y bajas características mecánicas que separa los revestimientos en una estructura sándwich, en este caso el Aserrín.

Esta estructura permite obtener valores de rigidez a flexión con un peso mínimo soportando todas las cargas en el plano y los momentos flectores, en comparación con los laminados monolíticos, otra de las principales ventajas de esta estructura es su ahorro de peso. La idea básica que permite entender la funcionalidad, en cuanto a resistencia mecánica en este tipo de estructuras, es que al separar los revestimientos se consigue aumentar la rigidez a flexión. (Romero Galera, 2010)

Figura 1.

Estructura tipo sándwich en materiales compuestos.

**3.Estado del arte**

(Najafi *et al.*, 2006). En este trabajo, emplearon una proporción de 50% aserrín y 50% plástico en peso vírgenes y/o reciclados, siendo estos polipropileno y polietileno de alta densidad. El estudio se basó en la determinación de las propiedades de flexión, tracción y resistencia al impacto, arrojando como resultado propiedades estadísticamente similares y comparables entre los compuestos hechos de plásticos vírgenes y reciclados. A partir de las conclusiones obtenidas del presente estudio, nos apoyamos en que el desarrollo del trabajo no se verá afectado por variabilidad en las propiedades mecánicas dependiendo del uso entre los plásticos más comúnmente empleados en la elaboración de madera plástica.

(Nourbakhsh & Ashori, 2009). En donde se elaboró madera plástica a partir de polietileno reciclado de alta densidad y fibras de aserrín mediante el prensado en caliente empleando una temperatura de 190°C a 3 MPa de presión por 6 minutos en la elaboración de sus probetas, variando la proporción de fibra de madera en 50%, 70% y 85% en peso, con el fin de evaluar propiedades

como resistencia a la flexión y absorción de agua. Del presente trabajo se tomó a consideración las condiciones de prensado en caliente para la elaboración de las probetas.

(González *et al.*, 2010). En donde desarrollaron una serie de probetas constituidas de materiales compuestos formados a partir de polipropileno y aserrín en diferentes proporciones (10-40%), con el fin de evaluar mediante ensayos de tracción, el efecto en las propiedades mecánicas del compuesto; Del estudio se tiene que a medida que se incrementa el porcentaje de aserrín la resistencia y ductilidad se ven disminuidas, sin embargo, es una alternativa viable el empleo del aserrín teniendo en cuenta costos y posibles aplicaciones. Del presente trabajo se toma a consideración las diferentes proporciones utilizadas para el aserrín, así como el número de malla seleccionado en la granulometría del material maderable.

(Cui *et al.*, 2010). Estudiaron los compuestos plásticos reforzados con fibra de madera fabricados a partir de polietileno de alta densidad reciclado y aserrín en diferentes proporciones (10%, 20%, 35% y 50%) y tamaños empleando compresión en caliente a 180 °C con 2.5 MPa de presión a 15 minutos, con el fin de evaluar sus propiedades térmicas, de flexión y resistencia al impacto.

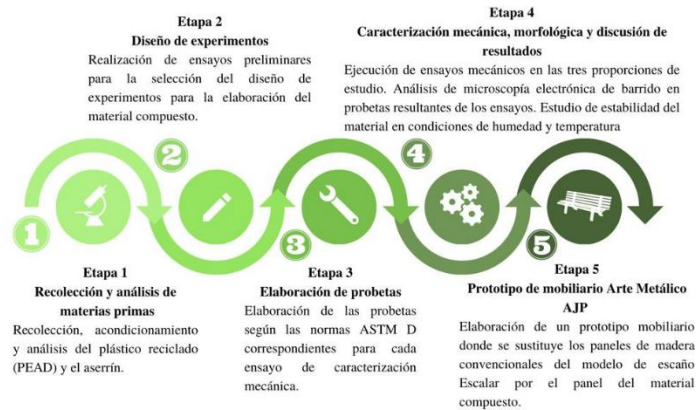
De lo anterior concluyeron que un alto contenido de fibra de madera puede conducir a una temperatura de fusión más alta que la del PEAD reciclado. En cuanto a la resistencia al impacto esta disminuye con la adición de fibra de madera, la resistencia a la flexión disminuye ligeramente a medida que aumenta la longitud de la fibra de madera y mediante microscopia determinaron que cuando empleando fibras largas, hay mayor probabilidad de fractura. Del presente trabajo se toma a consideración las diferentes proporciones de aserrín usadas, así como las condiciones de prensado e incorporamos el manejo de fibras cortas de aserrín de acuerdo con lo evaluado en el presente trabajo.

(Lima *et al.*, 2018). En donde desarrollaron compuestos de madera-plástico a partir de aserrín de cumarú y plástico de propileno (PP) reciclado con una proporción de 30% aserrín y 70% PP, con el fin de evaluar las propiedades físicas (densidad, absorción de agua e hinchamiento de espesor) y mecánicas (resistencia a la flexión, resistencia al impacto y dureza Rockwell) empleando diferentes cargas de prensado, siendo 2, 5, 8, 11 y 14 toneladas a 180 °C durante 20 minutos; De esta manera se pudo determinar que un aumento en la variación de fuerza aplicada favorece las propiedades físicas y mecánicas de los composites. Del presente trabajo tomamos a consideración los parámetros del prensado de las probetas, la proporción plástico-aserrín, y el número de malla evaluado para ambos materiales.

(Alvarenga Salinas *et al.*, 2020). En donde su objetivo fue estudiar las características mecánicas de tracción midiendo la resistencia estática del material empleando diferentes proporciones de concentración de las fibras de aserrín, siendo estas de 10% y 20% en peso. Del estudio se determinó que el incremento de las fibras de aserrín provee una excelente dureza al material pero así mismo disminuye su ductilidad. De acuerdo con los resultados obtenidos se toma a consideración el contenido de fibra de aserrín, así como el tamaño de partícula de la fibra de aserrín empleado.

4. Metodología

A continuación, se muestra detalladamente la metodología que se siguió para llevar a cabo la elaboración del material compuesto, donde se explican las condiciones a las que se realizaron las diferentes etapas y las normas referencia para las pruebas mecánicas y morfológicas. En el siguiente esquema se encontrará la secuencia de las etapas que se siguieron para este proceso.

Figura 2.*Etapas del proyecto.*

Etapa 1. Recolección y análisis de materias primas

Actividad 1.1 recolección de plástico y aserrín

Se realizó una campaña para acopio y recolección del material plástico y el aserrín durante 6 meses, la cual se realizó en las cuatro sedes de la empresa Arte metálico AJP ubicadas en Bucaramanga, Piedecuesta, La mesa de los santos y Barichara, Santander en las que actualmente se cuenta con la colaboración de 50 trabajadores. Ambos materiales pasaron por un proceso de disminución de tamaño de partícula y por análisis de caracterización.

El aserrín fue recolectado en carpintería de la empresa Arte metálico AJP proviene del proceso de lijado y aserrado en su gran mayoría, algunos de los productos que pasan por este proceso son: comedores, camas, estanterías, centros de mesa, sillas, etc. Sin embargo, este residuo está siendo desaprovechado. Por otra parte, el material plástico reciclado se recolectó en forma de tapas de envases de productos de limpieza y bebidas alimenticias.

Actividad 1.2 Acondicionamiento del plástico y aserrín

El acondicionamiento de la materia prima se basó en disminuir el tamaño de partícula con la ayuda de un molino Wiley mill, el cual uso una potencia de operación de 1.8 Hp y 1700 rpm. Sin embargo, el material polimérico necesito una etapa previa en donde se utilizó una trituradora Ingecad part S.A.S con una potencia de operación de 5.0 Hp y 1750 rpm donde se obtuvieron escamas de plástico que facilitaron el uso del molino. (Ver Apéndice B)

Para realizar la granulometría de la materia prima se requirió del uso de un juego de tamices del tipo (Estandar A.S.T.M E-11 y U.S. A) y una tamizadora eléctrica CL 313 F. Se usaron los tamices de malla 12 hasta la malla 30, incluyendo el fondo del juego de tamices. Se tomaron muestras de 40 g, con tiempos de residencia de 10 min.

Actividad 1.3 Análisis de caracterización del plástico y aserrín

Se realizó un análisis termogravimétrico (TGA, Thermogravimetric Analyzer) empleando el equipo TGA 5500 para ambos materiales.

Para el plástico se tomó una muestra de 21.48 mg, elevando su temperatura desde 25 °C hasta 650°C en un ambiente controlado de nitrógeno con un flujo de 5 ml/min, con el fin de propiciar la descomposición del polímero. La muestra se continuó calentando hasta alcanzar una temperatura de 750 °C usando aire, esto con el fin de analizar el proceso de combustión del material. El análisis se llevó a cabo con una velocidad de calentamiento de 10°C/min.

Para el aserrín se tomó una muestra de 7.95 mg, elevando su temperatura desde 25 °C hasta 220 °C en atmosfera de aire con un flujo de 50 ml/min., con el fin de observar el comportamiento del aserrín en las condiciones de prensado. El análisis se llevó a cabo con una velocidad de calentamiento de 10 °C/min.

Adicionalmente, se realizó el análisis de calorimetría diferencial de barrido (DSC, Differential Scanning Calorimetry) para el plástico con la finalidad de realizar una identificación del material empleando un calorímetro diferencial TA Instrument Q10. Se realizó tomando una muestra de 10 mg para dos corridas. La primera consistió en llevar el plástico desde 20°C hasta 200°C a una velocidad de calentamiento de 10°C/min en una atmósfera de nitrógeno, para posteriormente devolver la muestra a la temperatura inicial, la primera corrida se realizó con el fin de borrar la historia térmica del material. La segunda corrida se realizó a las mismas condiciones con el fin de evaluar el verdadero punto de fusión del material.

Etapas 2. Diseño de experimentos

Para seleccionar las proporciones de estudio, se realizaron tres ensayos preliminares de prensado donde se evaluó el comportamiento de la probeta usando las composiciones de extremos encontradas en la literatura para el material compuestos.

El primer ensayo se realizó con una composición con 90% de material polimérico y 10% aserrín. El segundo ensayo se realizó con una composición con 70% de material polimérico y 30% de aserrín. Se realizó un tercer ensayo teniendo en cuenta los resultados de los dos anteriores, para este se seleccionó una composición con 80% de material polimérico y 20% de aserrín.

Para los dos primeros ensayos se utilizaron las mismas condiciones de prensado, se usó una temperatura de 180 °C, 3 MPa a 6 min. En el tercer ensayo se decidió bajar la temperatura a 180 °C , mantener la presión en 3 MPa y aumentar el tiempo de prensado a 15 min.

Finalmente se propuso un diseño unifactorial de tres niveles, donde la variable independiente es la composición del material polimérico en el material compuesto.

Etapa 3. Elaboración de probetas

Las probetas se realizaron usando los moldes según las normas ASTM D para cada ensayo (ver Apéndice C), usando la prensa de vulcanización Bestora, a una temperatura de 180 °C y presión de 3 MPa durante 15 min. Durante la elaboración de las probetas se aplicó el aceite desmoldante conocido como taladrina, para facilitar el proceso de desmoldado. La finalidad de esta etapa es poder dar continuidad a la realización de los ensayos mecánicos.

Etapa 4. Caracterización mecánica

El material compuesto debe tener ciertas características mecánicas necesarias para su aplicación final en la empresa Arte metálico AJP es por esto por lo que es necesario recurrir a técnicas de caracterización donde se realicen los pertinentes ensayos a las probetas elaboradas.

Actividad 4.1 Ensayo de tensión

Este ensayo mide la resistencia de un material a una fuerza aplicada que es incrementada gradualmente (estática) (Caldas U. D., s.f.) Para realizar este ensayo se utilizó la norma ASTM D638-10 (Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics) usando la máquina universal de ensayos HSM58 Universal Material Tester (20 kN).

Para calcular la resistencia a la tracción y el porcentaje de elongación se siguió la metodología explicada en el Apéndice A.

Actividad 4.2 Ensayo de impacto

Son pruebas de corta duración que brindan información sobre el comportamiento de fallo de materiales sometidos a cargas breves y temperaturas variables (ROELL, s.f.). Para realizar este ensayo se utilizó la norma ASTM D6110-10 (Standard Test Methods for Determining the Charpy

Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics) usando el equipo Pendulum Impact Tester HSM 41. (25J)

Para calcular la resistencia al impacto se siguió la metodología explicada en el Apéndice A.

Actividad 4.3 Ensayo de Dureza

Esta prueba se realizó para evidenciar la capacidad del material a ser penetrado o rayado. Para realizar este ensayo se utilizó la norma ASTM D2240-10 (Standard Test Methods for Rubber Property- Durometer Hardness). Para la realización de este ensayo se hizo uso del durometro de dureza shore D, donde se tomaron cinco mediciones de dureza en diferentes posiciones, separadas por lo menos 6.0 mm.

Actividad 4.4 Selección de la proporción con mejores resultados

Con base en los resultados de los ensayos mecánicos, se estableció una rúbrica de ponderación que tiene como finalidad la selección de la proporción con los mejores resultados mecánicos para la aplicación del material compuesto en la empresa Arte Metálico AJP.

Se plantea una rúbrica de la siguiente manera; Se dio una escala de 1 a 3 para los resultados promedio de cada ensayo, asignando el valor de 1 al promedio más bajo de las proporciones, 2 al promedio intermedio y 3 al promedio más alto. Finalmente, la proporción seleccionada es aquella que obtenga la mayor puntuación total.

Actividad 4.5 Análisis de microscopia electrónica de barrido (SEM)

Se tomaron las micrografías de la superficie fracturada en los ensayos de tensión e impacto, con el fin de estudiar la distribución y dispersión del aserrín en la matriz polimérica en cada una de las proporciones. Inicialmente se realizó la preparación de la muestra, un recubrimiento con oro

fue aplicado usando el Creassington sputter coater 108 auto. Posteriormente empleando el Tescan Vega 3 se llevó a cabo la microscopia a 5 kV. El estudio de la distribución se realizó en tres diferentes magnificaciones; 30X, 200X y 600X.

Actividad 4.6 Prueba de estabilidad

En arte metálico AJP se tienen dos líneas principales de comercialización, la línea de interiores y la línea de exteriores. Esta prueba consiste en variar condiciones de humedad y temperatura usando el equipo Daihan Cientific para identificar en qué línea podrá ser usado el material compuesto. La prueba se llevó a cabo sometiendo el material a las condiciones extremas, una temperatura de 33.8 °C (Arias, 2020) y una humedad relativa del 89% (Clima Bucaramanga: Temperatura, Climograma y Tabla climática para Bucaramanga - Climate-data.org, s. f.). promedio que han sido registradas en la ciudad de Bucaramanga. Finalmente se evaluó el aspecto final del material respecto al inicial en dos revisiones, la primera realizada a los 7 días y la segunda a los 14 días.

Etapas 5. Elaboración del prototipo de mobiliario para la empresa Arte Metálico AJP

Se realizó un prototipo de mobiliario en la empresa Arte Metálico AJP, donde se sustituirá los paneles de madera del modelo de escaño Escalar por el panel elaborado con el material compuesto, elaborado con la proporción seleccionada en la Actividad 4.4.

Este panel se realizará utilizando la prensa Ingecad Part S.A.S, las dimensiones iniciales del panel están dadas por las medidas de la prensa, esta cuenta con 1 m de ancho por 1 m de largo. El proceso de elaboración del panel se dividió en dos fases, en la primera se sometió la estructura a un calentamiento en el horno a una temperatura de 180 °C, esta fase se llevó a cabo por dos

horas, para finalmente con el material previamente fundido llevara a cabo el prensado durante 2 horas. (Ver apéndice F)

Este panel será cortado según sea necesario para el acople con el modelo de escaño Escalar. Con el fin de obtener mejores resultados al momento de desmoldar el panel y evitar daños en el material se empleará choque térmico permitiendo un desmolde más eficaz.

Finalmente, el panel del material compuesto prensado fue trasladado a la carpintería de la empresa Arte Metálico AJP, donde fue cortado, pulido y finalmente ensamblado en la estructura metálica. Adicionalmente se elaboró una mesa auxiliar con el panel sobrante de la elaboración del escaño.

5.Resultados

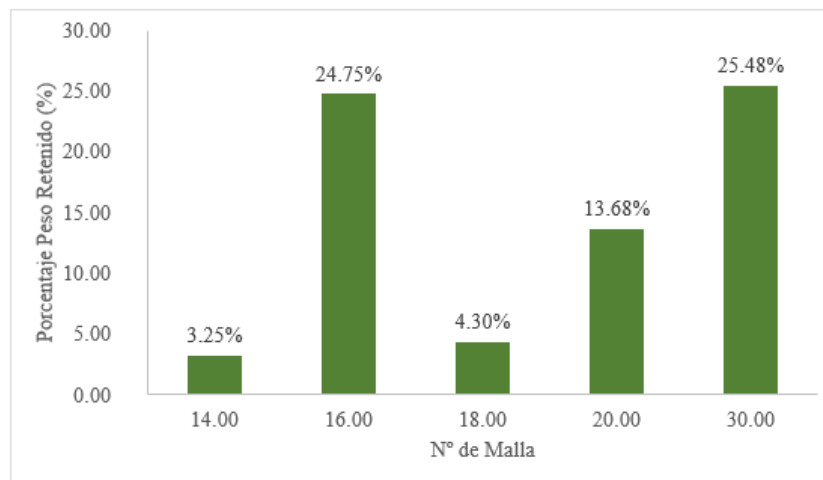
5.1.Recolección y análisis de materias primas.

El plástico reciclado recolectado proviene en gran parte de la campaña de recolección generada en la empresa Arte Metálico AJP, sin embargo, los autores de este proyecto junto con sus núcleos familiares recolectaron a su vez tapas de productos que se consumían en sus hogares y en el día a día. Cabe la pena resaltar que el mayor volumen reciclado de material plástico se dio en la sede de Barichara, Santander. En esta sede se cuenta no solo con la galería de arte y decoración sino, además, está presente el hostel boutique La Cima, negocio familiar complementario de la empresa. El gran volumen recolectado allí se debe principalmente a la presencia de un restaurante – cafetería en el cual se llevó a cabo la campaña de recolección de tapas plásticas simultáneamente con las otras sedes. En total se recolectaron acerca de 5 bultos de tapas plásticas.

El aserrín recolectado es una mezcla de maderas como, Cedro (*Cedrela odorata*) y Flor morada (*Tabebuia impetiginosa*) que se encuentran presentes actualmente en la fabricación de muebles en la empresa Arte metálico AJP. Durante seis meses se logró recolectar un volumen basto de residuo de aserrín, pues se calculó que, por mes, se obtenían alrededor de 8 bultos de material. El análisis granulométrico del aserrín se presenta en la Figura 3.

Figura 3.

Granulometría del aserrín.



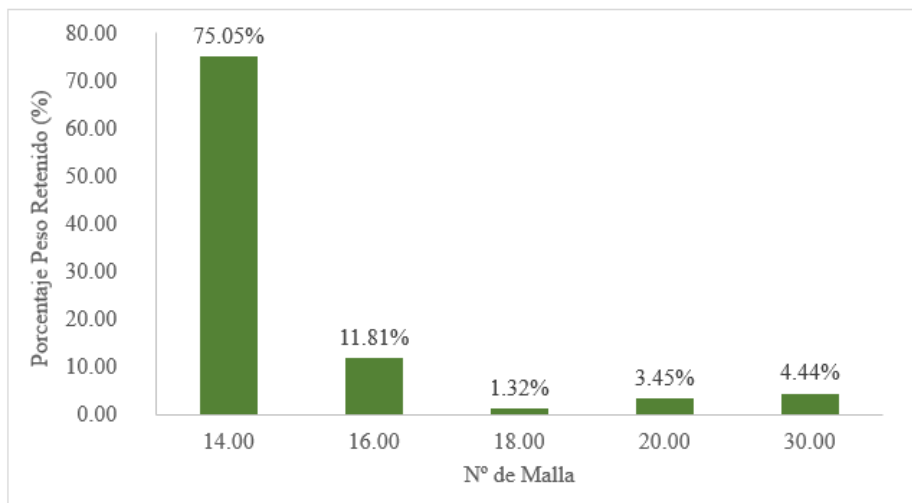
Como se puede observar en la Figura 3 de la distribución de tamaños del aserrín molido, la mayor cantidad de aserrín se encuentra retenida en la malla N° 30 correspondiente a un tamaño de malla de 600 micras. Esta cantidad retenida corresponde a un 25.48% del total de la muestra.

Así mismo se ha estudiado que el aserrín obtenido del tamiz de 600 micras que corresponde a la malla N° 30, genera una mezcla homogénea combinada que resulta útil para una matriz polimérica (Cui et al., 2010), por lo cual es el tamaño adecuado para la elaboración del material compuesto.

De igual forma se presenta el análisis granulométrico del material polimérico realizado en la Figura 4.

Figura 4.

Granulometría del material polimérico.

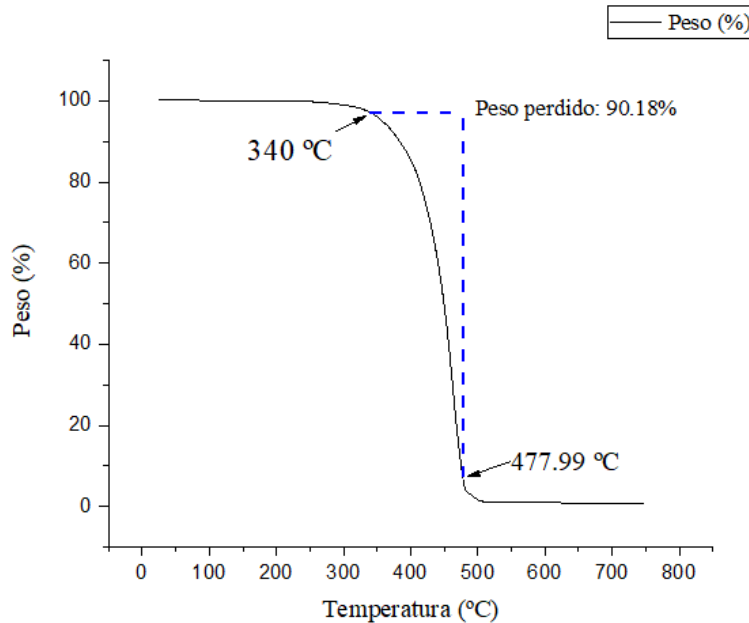


En la Figura 4 se encuentra reflejada la distribución de tamaños del material polimérico, la mayor cantidad de material polimérico se encuentra retenida en la malla N° 14 correspondiente a un tamaño de malla de 1400 micras. Sin embargo, según lo estudiado en la literatura el tamaño de partícula no tiene una repercusión significativa en las propiedades del material, ya que este finalmente fue fundido en el proceso de prensado. El tamaño de partícula afectó únicamente al tiempo empleado en el proceso de prensado, donde a mayor tamaño de partícula, se obtuvo un mayor tiempo de prensado. Con base en lo anterior se decidió usar en su totalidad el material polimérico molido para la elaboración del material compuesto.

Con el fin analizar el comportamiento del plástico y del aserrín se realizó un estudio por Termogravimetría para ambos materiales, representados en la Figura 5 y Figura 6.

Figura 5.

Análisis termogravimétrico (TGA) del plástico.

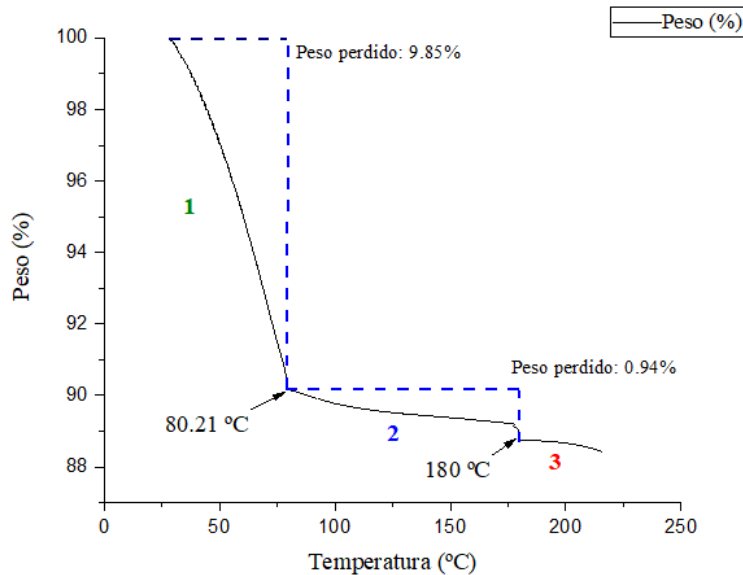


Nota: Adaptado de TA Instruments Trios V5.1.1.46572

En la Figura 5 se puede observar que el material soporta una temperatura de 340 °C antes de comenzar el proceso de degradación, es decir que esta es la temperatura límite superior a la cual se puede realizar el proceso de prensado. Dentro del intervalo de temperaturas 340 °C - 478 °C se registra una pérdida 19.376 mg que corresponden al 90.18% de la muestra. Finalmente, en 478 °C la muestra ha sido descompuesta totalmente.

Figura 6.

Análisis termogravimétrico (TGA) del aserrín.



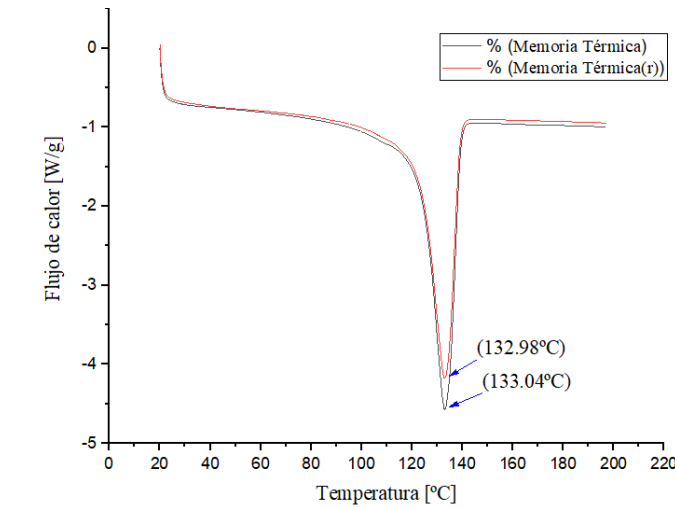
Nota: Adaptado de TA Instruments Trios V5.1.1.46572.

Como se puede evidenciar en la Figura 6, la muestra de aserrín presenta inicialmente pérdida de masa del 9.847% del total, siendo está asociada a la pérdida de humedad extrínseca, la cual es absorbida del ambiente de forma natural. Al seguir incrementando la temperatura la muestra presenta cierta estabilidad respecto al porcentaje de masa perdida siendo tan solo del 0.945% desde 80 °C hasta los 180 °C, siendo esta la temperatura límite soportada por el aserrín antes de empezar su proceso de degradación u oxidativo. De lo anterior se considera una temperatura de prensado igual o inferior a los 180 °C.

Adicionalmente se realizó un estudio por calorimetría diferencial de barrido para el plástico representado en la Figura 7.

Figura 7.

Calorimetría diferencial de barrido (DSC) del plástico.



Nota: Adaptado de Universal V4.7 TA Instruments.

De la Figura 7 se obtuvo que el valor del punto de fusión es de 132.9 °C, temperatura que fue tomada como referencia para el límite inferior del proceso de prensado. Adicionalmente con este análisis se pudo encontrar la presencia de un solo tipo de plástico, siendo este polietileno de alta densidad (PEAD), el cual de acuerdo con la literatura presenta un punto de fusión entre 130 °C - 135 °C. (Naranjo, Alberto et al., 2008)

5.2.Diseño de experimentos

Con la proporción de 90:10 de material polimérico y aserrín respectivamente, se evidenció que al tener una proporción tan grande del material polimérico no se acoplaban muy bien los materiales, generando una porosidad alta en la probeta. Con la proporción de 70:30 de material polimérico y aserrín respectivamente, se evidencio que cuando el aserrín aumenta en su proporción, no se tiene una matriz que acople ambos compuestos, y la probeta finalmente no se

obtiene porque las partículas de aserrín no forman un material compacto, generando que este finalmente se desmorone. (Ver Apéndice D)

En el tercer ensayo, realizado con la proporción 80:20 de material polimérico y aserrín respectivamente, se obtuvo un buen ensamblaje entre ambos compuestos, donde se obtiene un material compacto, en el cual no se observan poros alarmantes, ni se tiene complicación en su desmoldaje. En consecuencia de esto se realizaron ensayos con proporciones cercanas a la propuesta donde se obtuvieron resultados similares, siendo estas las proporciones 85:15 y 75:25 de material polimérico y aserrín respectivamente (Ver Apéndice D).

Analizando los resultados obtenidos se pudo definir los niveles de mejor conveniencia a trabajar, para obtener un material homogéneo y resistente. Se planteó el siguiente plan de experimentación Tabla 4 en el que será evaluado para cada nivel sus propiedades mecánicas.

Tabla 4.

Diseño experimental.

Proporción de (HDPE) [%]	Proporción de Aserrín [%]
75	25
80	20
85	15

5.3. Caracterización mecánica

Los resultados obtenidos del ensayo de tensión para el material compuesto se aprecian en la Tabla 5 y Tabla 6.

Tabla 5.*Porcentaje de elongación del material compuesto en el ensayo de tensión.*

ENSAYO TENSIÓN						
# de prueba	1	2	3	4	5	Promedio
Proporción plástico/Aserrín	Elongación [%]	Elongación [%]	Elongación [%]	Elongación [%]	Elongación [%]	Elongación [%]
75:25	4.3	5.7	4.8	5.2	5.0	5.0
80:20	3.0	3.6	4.4	3.3	3.6	3.6
85:15	4.8	4.4	5.4	4.0	4.1	4.5

Tabla 6.*Resistencia a la tracción del material compuesto en el ensayo de tensión.*

ENSAYO TENSIÓN						
# de prueba	1	2	3	4	5	Promedio
Proporción plástico/Aserrín	Resistencia a la tracción [MPa]	Resistencia a la tracción [MPa]	Resistencia a la tracción [MPa]	Resistencia a la tracción [MPa]	Resistencia a la tracción [MPa]	Resistencia a la tracción [MPa]
75:25	0.794	1.190	1.190	1.190	0.794	1.032
80:20	0.397	0.397	1.190	1.190	0.397	0.714
85:15	0.794	0.794	1.190	0.794	0.794	0.873

De acuerdo con los resultados en las Tablas 5 y 6 la proporción de menor resistencia a la tensión es la proporción 80:20 debido a que la fuerza máxima antes del quiebre es la más baja. El

mejor resultado se obtuvo con la proporción 75:25 ya que presenta una mejor resistencia a la tracción con un promedio de 1.032 MPa. Se tomó evidencia fotográfica de las probetas resultantes del ensayo. (Ver apéndice E)

Los resultados obtenidos del ensayo de impacto para el material compuesto se aprecian en la Tabla 7.

Tabla 7.

Resistencia al impacto del material compuesto en el Ensayo de impacto

ENSAYO DE IMPACTO						
# de prueba	1	2	3	4	5	Promedio
Proporción plástico/Aserrín	Resistencia al impacto [J/m²]	Resistencia al impacto [J/m²]	Resistencia al impacto [J/m²]	Resistencia al impacto [J/m²]	Resistencia al impacto [J/m²]	Resistencia al impacto [J/m²]
75:25	2543	1741	2341	2140	1346	2022
80:20	3974	3358	3768	4593	4180	3974
85:15	4593	3974	4386	3974	4386	4263

Como se puede observar en la Tabla 7 entre menor es la proporción de aserrín en el material, mayor es su resistencia al impacto, dejando en evidencia que la proporción 85:15 es la más resistente con un valor de 4263 J/m². Se tomó evidencia fotográfica de las probetas resultantes del ensayo. (Ver apéndice E)

Los resultados obtenidos del ensayo de dureza para el material compuesto se aprecian en la Tabla 8.

Tabla 8.

Porcentaje de dureza del material compuesto en el ensayo de dureza.

ENSAYO DE DUREZA						
# de prueba	1	2	3	4	5	Promedio
Proporción plástico/Aserrín	Dureza [% Shore D]	Dureza [% Shore D]	Dureza [% Shore D]	Dureza [% Shore D]	Dureza [% Shore D]	Dureza [% Shore D]
75:25	28	30	50	39	36	36.6
80:20	45	35	50	55	47	46.4
85:15	42	48	55	60	55	52.0

De acuerdo con los resultados de la Tabla 8, se puede observar que a medida que se disminuye la proporción de aserrín aumenta la dureza en el material compuesto, estableciendo así, un resultado mayor para la proporción 85:15 de 52.0 Dureza Shore D.

Finalmente, en relación con los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos en la Tabla 9, se presenta la ponderación de estos para cada proporción de estudio.

Tabla 9.

Ponderación de resultados.

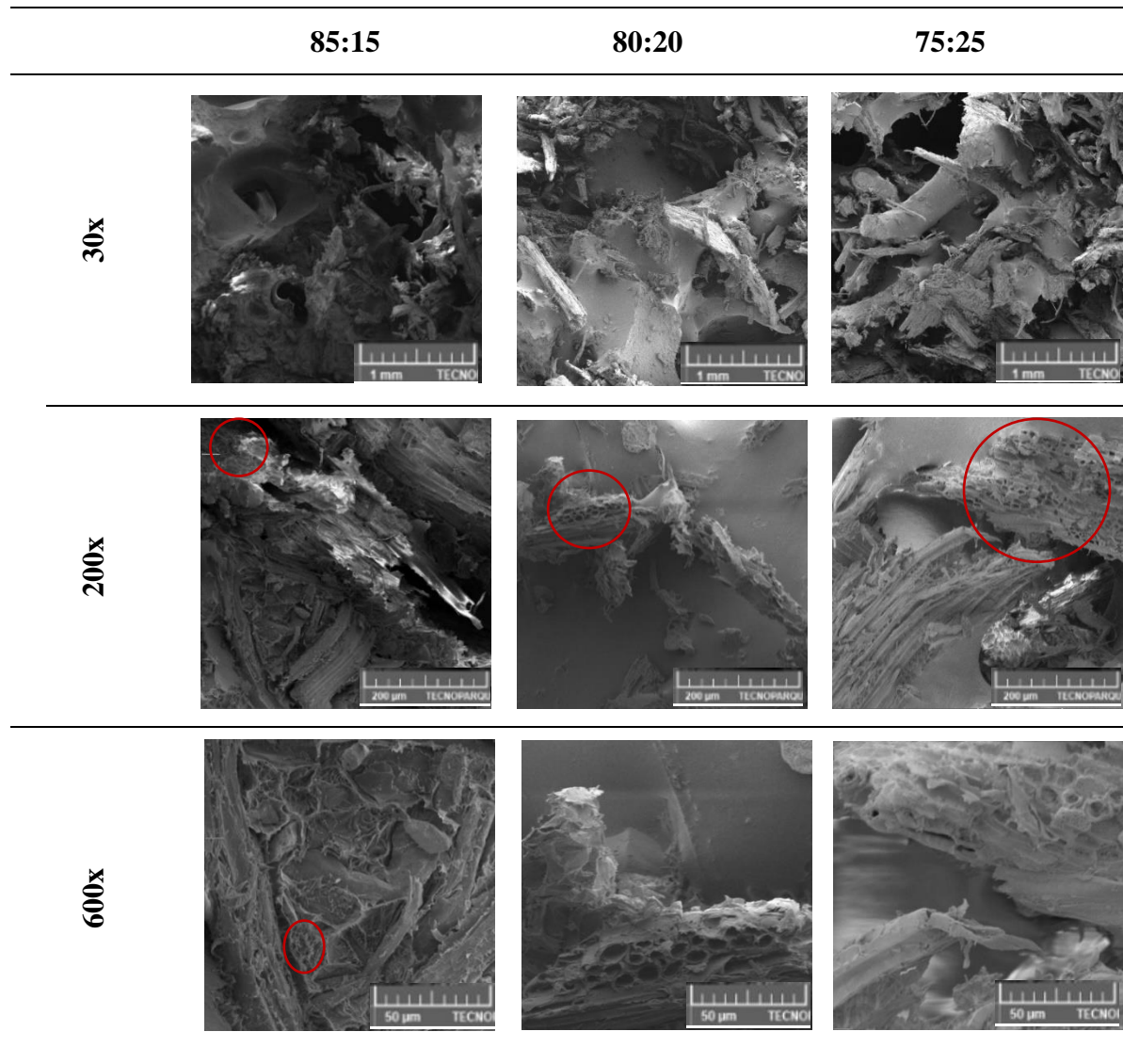
Proporción	75:25	80:20	85:15
Ensayo			
Tensión	3	1	2
Dureza	1	2	3
Impacto	1	2	3
Total	5	5	8

De acuerdo con los resultados de Tabla 9 la proporción con mejores resultados en los ensayos mecánicos es la 85:15 de material polimérico y aserrín respectivamente, por lo cual esta será la proporción seleccionada para realizar el prototipo del mobiliario para la empresa Arte Metálico AJP.

Los análisis por microscopía electrónica de barrido realizado en la sección transversal de corte de las probetas de impacto y tensión en sus diferentes magnificaciones se presentan a continuación en la Tabla 10 y Tabla 11 respectivamente.

Tabla 10.

Micrografía en sección transversal de probetas del ensayo de impacto a 30x, 200x y 600x para cada proporción de estudio.

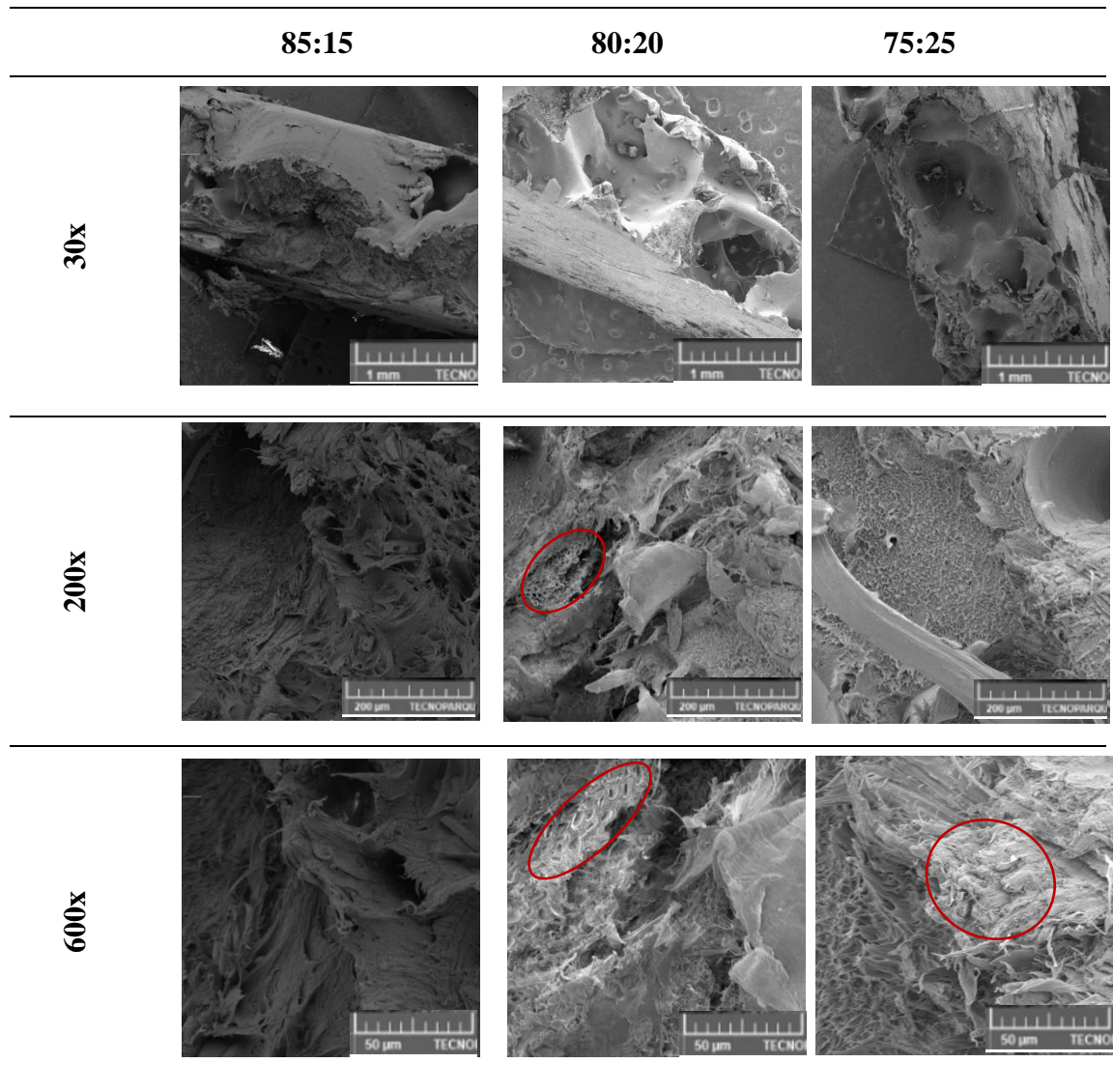


En las micrografías en la Tabla 10, resultantes del ensayo de impacto es posible visualizar la distribución de los materiales. En la primera fila se encuentran las imágenes obtenidas de la amplificación de 30x es posible observar la fractura que sufrió la probeta, se puede ver que en los

cortes no se presenta un estiramiento de ninguno de los materiales, al contrario, se evidencian superficies lisas con cortes definidos. En la segunda fila se encuentran las imágenes obtenidas de la amplificación de 200x, fue posible reconocer la estructura tubular característica del aserrín, la cual se encuentra señalada (círculo rojo), al contrario del PEAD el cual es posible reconocer por superficies lisas. Por otro lado, se puede observar el aumento de fracciones con estructura tubular a medida que disminuye la proporción de plástico, como era de esperarse, sin embargo, en todas las imágenes es posible evidenciar que el PEAD cumple su función de matriz envolvente. Finalmente, en la tercera fila encontramos las imágenes de la amplificación de 600x, en la cual se pueden observar a más detalle la estructura tubular del aserrín y zonas lisas correspondientes al PEAD.

Tabla 11.

Micrografía en sección transversal de probetas del ensayo de tensión a 30x, 200x y 600x para cada proporción de estudio.

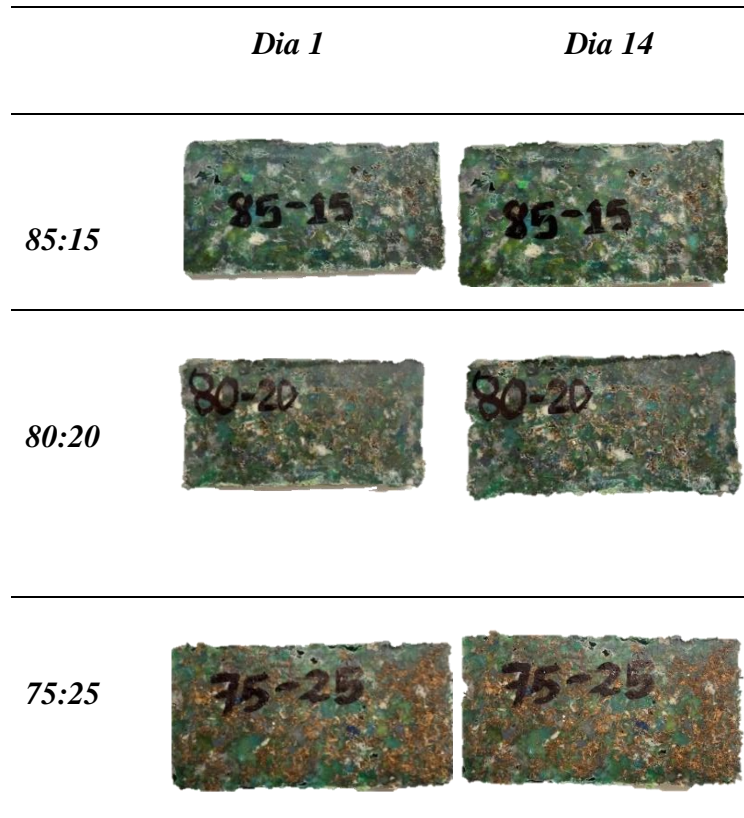


En las micrografías de Tabla 11 correspondientes a las muestras resultantes del ensayo de tensión es posible visualizar la distribución de los materiales y su estiramiento dado por la naturaleza del ensayo. En la primera fila se encuentran las imágenes obtenidas de la amplificación

de 30x, en las imágenes es posible ver el corte transversal resultante del ensayo, sin embargo, no es posible visualizar una tendencia en el comportamiento de los materiales. En la segunda fila se encuentran las imágenes obtenidas de la amplificación de 200x, en estas ya es posible visualizar que el PEAD presenta una superficie rugosa, en la que se observan fibras alargadas de este, a diferencia de lo que se podía observar en la microscopía de impacto, lo cual se debe principalmente a que en este ensayo el material es alargado hasta el punto de fracturarse, creando fibras alargadas del material. Finalmente, en la tercera fila encontramos las imágenes de la amplificación de 600x, donde se observa con más detalle la superficie rugosa del plástico en la que puede observarse pequeñas fibras alargadas, además se puede apreciar que la estructura tubular del aserrín sufre una deformación debido a la tensión llevada a cabo en el ensayo.

En las micrografías de los ensayos de impacto y tensión se observa que la zona de fractura se caracteriza por la presencia de burbujas que favorecen la falla en estas zonas, Adicionalmente se observa una distribución homogénea de ambos materiales.

A continuación, en la Tabla 12 se evidencian los resultados obtenidos de la prueba de estabilidad.

Tabla 12.*Prueba de estabilidad.*

De acuerdo con el análisis estabilidad, el material no evidenció cambios significativos que pudieran alterar sus propiedades al ser empleado en la elaboración de muebles para la línea de exteriores en ninguna de las dos revisiones. Su aspecto final no presenta ningún cambio respecto al día de ingreso, el material no cambia de color ni olor, ni se evidencia disminución en la resistencia.

5.4.Elaboración del prototipo de mobiliario para la empresa Arte Metálico AJP.

Para la realización del panel se utilizaron 17 kg de PEAD triturado y 3 kg de aserrín. El panel fue elaborado en tres capas para conformar la estructura sándwich, la primera y tercera capa

se realizó únicamente con PEAD triturado y la segunda capa se realizó con una mezcla de aserrín y PEAD triturado.

Figura 8.

Prototipo final de la referencia de escaño Escalar y mesa auxiliar de la empresa Arte Metálico AJP usando el panel del material compuesto realizado con la proporción 85:15.



Como se observa en la Figura 8, el ensamble entre el panel y la estructura metálica fue llevada con éxito, el material tuvo el mismo tratamiento de ensamblaje que la madera tradicional, la cual se lleva a cabo por medio de fijaciones en los extremos. Respecto a su apariencia y textura, los mobiliarios son llamativos debido a los colores vivos y el movimiento visual que aporta el PEAD al ser fundido y prensado; la textura del panel no llega a ser completamente lisa, es posible sentir un relieve en este, sin embargo, no es molesto, ni áspero.

6. Conclusiones

Se logró desarrollar un prototipo mobiliario para la empresa Arte Metálico AJP, que tiene la posibilidad de ser aplicado en la línea de exteriores. En este prototipo se reemplazó la madera convencional usada en la empresa, por el material compuesto de matriz polimérica (PEAD) reforzado con fibras de aserrín, el cual se realizó mediante la técnica de prensado en caliente a 180 °C, 3 MPa, durante dos horas.

Se estableció el rango de temperatura de operación óptimo para obtener el material compuesto, el cual es delimitado por el tipo de madera empleado; en el caso puntual de este proyecto la mezcla de cedro y flor morada presenta un rango óptimo de operación entre 80 °C y 180 °C.

Así mismo se logró evidenciar una única presencia de PEAD, gracias a su temperatura de fusión correspondiente a 133 °C. Por otra parte, se trabajó con un tamaño de partícula para el aserrín de 600 micras y adicionalmente se definió que el tamaño de partícula del PEAD empleado en el material no tiene ninguna repercusión sobre este.

Se evidenció que a medida que aumenta el porcentaje de plástico las propiedades mecánicas mejoran. La proporción con mejores resultados fue 85% PEAD y 15% aserrín obteniendo una resistencia al impacto de 4263 J/m², dureza Shore D 52, resistencia a la tracción de 0.873 MPa con un porcentaje de elongación de 4.5%.

7. Recomendaciones

Se recomienda estudiar la técnica de extrusión de plástico para la elaboración del material compuesto, con la finalidad de comparar las propiedades mecánicas resultantes.

Se recomienda estudiar un proceso posterior al prensado que permita la curvatura del material para su aplicación en la tendencia Bold mobiliaria en la empresa Arte Metálico AJP.

Se recomienda estudiar la implementación de varios tipos de aglomerantes con el objetivo de favorecer el aprovechamiento de mayor cantidad de aserrín en la elaboración del panel.

Se recomienda evaluar el uso de distintos tamaños de aserrín en la mezcla con el fin de reducir la formación de burbujas.

Evaluar propiedades mecánicas del material luego de ser sometido a periodos de envejecimiento con y sin aplicación de aditivos estabilizantes UV.

Referencias Bibliográficas

- Alvarenga Salinas, G. A., Giangreco, E., Bobadilla Torres, W., Sastoque Guerrero, J., Sánchez, C., & Maíz Flecha, M. M. (2020). Caracterización de material compuesto con Polietileno Tereftalato post - consumo y aserrín. *Investigaciones y Estudios - UNA*, 11(2), 12–21. <https://doi.org/10.47133/ieuna2022>
- Arandes, J. M., Bilbao, J., & Valerio, D. L. (2004). RECICLADO DE RESIDUOS PLÁSTICOS. Arpet.org. Recuperado 22 de agosto de 2022, de <http://arpet.org/docs/Reciclado-de-residuos-plasticos-Revista-Iberoamericana-de-Polimeros.pdf>
- Arias, J. (2020). Este miércoles ha sido el día más caluroso del año en Bucaramanga. *Vanguardia*. <https://www.vanguardia.com/area-metropolitana/bucaramanga/este-miercoles-ha-sido-el-dia-mas-caluroso-del-ano-en-bucaramanga-EF2034134>
- Blanco, H. M. (Ed.). (2018). Hasta 70% de los residuos sólidos del país se pueden transformar en compostaje. *LA REPÚBLICA*. <https://www.larepublica.co/responsabilidad-social/hasta-70-de-los-residuos-solidos-del-pais-se-pueden-transformar-en-compostaje-2762298>
- Burgos Enriquez, D., Héctor, A. M., & Pulido, A. (2019). Edu.co. Recuperado 24 de agosto de 2022, de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/29139/2020dianaburgos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Clima Bucaramanga: Temperatura, Climograma y Tabla climática para Bucaramanga - *Climate-data.org*. (s. f.). *Climate-data.org*. Recuperado 12 de septiembre de 2022, de <http://climate-data.org/>

Composites, N. (s. f.). Naval Composites. Naval Composites. Recuperado 23 de agosto de 2022, de <https://www.navalcomposites.com>

Cui, Y. H., Tao, J., Noruziaan, B., Cheung, M., & Lee, S. (2010). DSC analysis and mechanical properties of wood—plastic composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29(2), 278–289. <https://doi.org/10.1177/0731684408097766>

Encuesta ambiental industrial (EAI). (2020). Gov.co. Recuperado 22 de agosto de 2022, de <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/ambientales/encuesta-ambiental-industrial-eai>

González Sosa, J. V., Barba Pingarron, A., Flores Aguilar, E., Sánchez Pérez, F., Santillán Gómez, M., Alfredo, D., Garrido, J., Enciso, M. Á., Trujillo Barragán, M., Gilberto, R., & Navarro, V. (2010). COMPORTAMIENTO DE UN COMPUESTO PLASTICO RECICLADO-MADERA (ASERRIN) EN EL ENSAYO DE TRACCIÓN. Org.mx. Recuperado 22 de agosto de 2022, de http://somim.org.mx/memorias/memorias2010/A3/A3_200.pdf

Hans G. Richter, José Antonio Silva Guzmán, Francisco Javier Fuentes Talavera, Raúl Rodríguez Anda, & Paola Andrea Torres Andrade. (2012). Fichas de Propiedades Tecnológicas de las Maderas. En *Industrialización, Comercialización y Manejo Sostenible de Diez Especies Nativas Mexicanas*. https://www.itto.int/files/itto_project_db_input/2596/Technical/Capitulo%207%20Fichas%20Tecnol%C3%B3gicas%20de%20las%20Especies%20de%20Madera.pdf

Lima, D. C. de, Melo, R. R., Santana, R. R. C., Botan, E., Santana, R. M. C., & Stangerlin, D. M. (2018). COMPÓSITOS MADEIRA-PLÁSTICO MANUFATURADOS COM

RESÍDUOS DE SERRARIA E EMBALAGENS DESCARTADAS DE POLIPROPILENO. *Nativa*, 6(1), 79. <https://doi.org/10.31413/nativa.v6i1.4432>

López Chalarca, Liliana Trinidad, Vega Rodríguez, Leidy Yaneth, Rendón Colorado, Carlos Daniel, & Tobón Rojas, Sebastián. (2019). Aprovechamiento de residuos madereros: Cuantificación, caracterización y valorización. Fondo Editorial Remington. <https://www.uniremington.edu.co/wp-content/uploads/libros-de-investigacion/aprovechamiento-de-residuos-madereros.pdf>

Najafi, S. K., Hamidinia, E., & Tajvidi, M. (2006). Mechanical properties of composites from sawdust and recycled plastics. *Journal of Applied Polymer Science*, 100(5), 3641–3645. <https://doi.org/10.1002/app.23159>

Naranjo, Alberto, Noriega, María del Pilar, Osswald, Tim A., Roldán-Alzate, Alejandro, & Sierra, Juan Diego. (2008). Thermal Properties. En *Plastics Testing and Characterization - Industrial Applications*. Editorial Hanser.

Nourbakhsh, A., & Ashori, A. (2009). Preparation and properties of wood plastic composites made of recycled high-density polyethylene. *Journal of Composite Materials*, 43(8), 877–883. <https://doi.org/10.1177/0021998309103089>

Polietileno de alta densidad. (2021). Atarfil. Recuperado 23 de agosto de 2022, de <https://www.atarfil.com/noticia/polietileno-alta-densidad-hdpe/>

Polietileno-HDPE. (s. f.). Com.pe. Recuperado 24 de agosto de 2022, de <https://www.emacin.com.pe/pdf/Ficha-tecnica-Polietileno-de-alta-densidad-HDPE.pdf>

¿Qué es una astilla de madera? (2017). Maderea. <https://www.maderea.es/astillas-de-madera-uso-dimensiones-y-humedad/>

Romero Galera, M. L. (2010). ESTRUCTURAS TIPO SÁNDWICH. En ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE PANELES SÁNDWICH EMPLEADOS EN EL CARENADO DE AVIONES COMERCIALES (pp. 7–18).

<https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/4860/direccion/VOLUMEN+1%252F>

Semana. (2021, marzo 1). En Colombia se recicla menos del 17% de la basura que se genera.

Revista Semana. <https://www.semana.com/en-colombia-se-recicla-menos-del-17-de-los-residuos-que-se-generan/59739/>

Serret Guasch, Nurian, Giralt Ortega, Giselle, & Quintero Ríos, Mairet. (2016). Caracterización de aserrín de diferentes maderas. *Tecnología Química*, 36(3), 395-405. Recuperado en 23 de agosto de 2022, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852016000300012&lng=es&tlng=es.

Apéndice

Apéndice A. Método de cálculo para los ensayos de tensión e impacto

Ensayo de tensión

Para calcular la resistencia a la tracción se hace dividiendo la carga máxima sostenida por la probeta entre el área transversal original en el segmento de longitud evaluado.

$$\text{Resistencia a la tracción [MPa]} = \frac{\text{Carga máxima [N]}}{\text{Área transversal [mm}^2\text{]}} \quad (\text{Ec. 1})$$

Para calcular el porcentaje de elongación se usa la diferencia entre la longitud inicial de la probeta y la longitud de la probeta después de aplicado el esfuerzo.

$$\% \text{ Elongación} = \frac{l_f - l_o}{l_o} \times 100 \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde l_o hace referencia a la longitud de la sección estrecha de la probeta inicialmente y l_f hace referencia a la sección estrecha luego de haber realizado el esfuerzo

Ensayo de impacto

Para calcular la resistencia al impacto es necesario calcular la altura alcanzada por el péndulo al romper la muestra y posteriormente la energía absorbida para cada uno, para ello se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$H_1 - H_2 = R * (\text{Cos}\beta - \text{Cos}\alpha) \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde, H_1 representa la altura inicial del péndulo, H_2 representa la altura final del péndulo, R representa el largo del péndulo, $\text{Cos}\beta$ representa el ángulo final del péndulo y $\text{Cos}\alpha$ el ángulo inicial del péndulo. Seguido de ello se calcula la energía absorbida, usando la siguiente ecuación:

$$\text{Energía absorbida [J]} = m * 9.81 * (H_2 - H_1) \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde m , representa la masa del péndulo.

Finalmente se calcula la resistencia de impacto mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Resistencia al impacto} \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^2} \right] = \frac{\text{Energía absorbida [J]}}{\text{Área de impacto [m}^2\text{]}} \quad (\text{Ec. 5})$$

Apéndice B . Evidencia de recolección y acondicionamiento de la Etapa 1.

Figura B1.

Preparación del aserrín recolectado de la empresa Arte metálico AJP; (a)Aserrín recolectado;(b) Aserrín molido en WILLEY MILL; (c) Tamizado del aserrín.



(a)



(b)



(c)

Figura B2.

Acondicionamiento del plástico reciclado recolectado; (a) Plástico recolectado;(b) Plástico recolectado triturado; (c) Plástico recolectado molido.



(a)



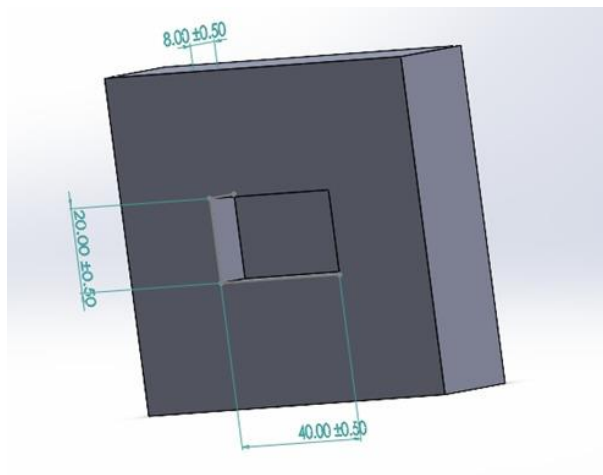
(b)



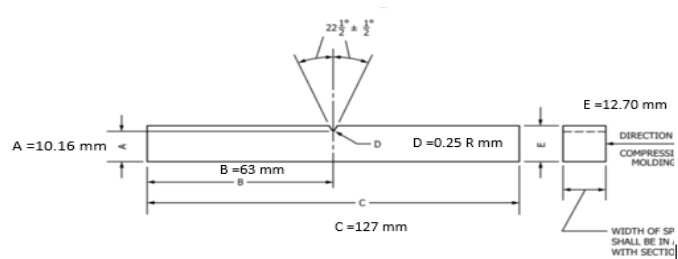
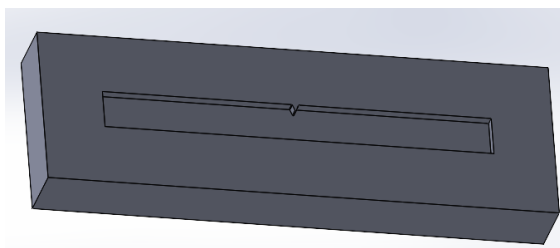
(c)

Apéndice C. Planos de las probetas según la norma ASTM D.**Plano 1.**

Probeta para ensayo de dureza norma ASTM D2240-10.

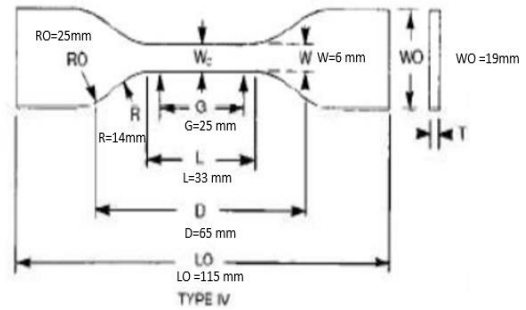
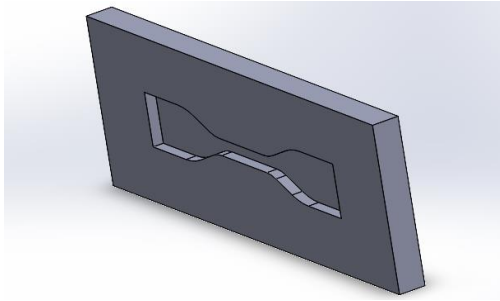
**Plano 2.**

Probeta para ensayo de impacto norma ASDTM 6110.



Plano 3.

Probeta para ensayo de tensión norma ASDTM 638.



Apéndice D. Ensayos realizados para la elaboración del diseño de experimentos.

Figura D1.

Probetas del ensayo 1 y 2. (a) Probeta de 90:10 de plástico y aserin respectivamente; (b) Probeta 70:30 de plástico y aserin respectivamente.



(a)



(b)

Figura D2.

Probetas del ensayo 3 y probetas prueba con las proporciones del diseño d experimentos.



Apéndice E. Probetas fracturas en los ensayos mecánicos.

Figura E1.

Probetas fracturadas del ensayo de tensión.



Figura E2.

Probetas fracturadas del ensayo de impacto



Apéndice F. Etapas de elaboración del panel usado en el escaño Escalar.

Figura F1

(a) Segunda capa: mezcla plástico-Aserrín, (b) Última capa: Plástico seleccionado para efecto de mejor acabado, (c) Panel prensado.



(a)



(b)



(c)