



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN ADECUADOS PARA EL  
PROCESAMIENTO DE LA MADERA PLÁSTICA, FABRICADA A PARTIR DE RESIDUOS DE  
ASERRÍN Y POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD DE RECICLADO PRIMARIO**

**María Eugenia Guerra Salazar**

Asesorado por el Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus

Guatemala, noviembre de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN ADECUADOS PARA EL  
PROCESAMIENTO DE LA MADERA PLÁSTICA, FABRICADA A PARTIR DE RESIDUOS DE  
ASERRÍN Y POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD DE RECICLADO PRIMARIO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**MARÍA EUGENIA GUERRA SALAZAR**

ASESORADO POR EL ING. JORGE EMILIO GODÍNEZ LEMUS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERA QUÍMICA**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Wong Daví
EXAMINADOR	Ing. Jaime Domingo Carranza González
EXAMINADOR	Ing. Víctor Herbert de León Morales
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez.

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN ADECUADOS PARA EL PROCESAMIENTO DE LA MADERA PLÁSTICA, FABRICADA A PARTIR DE RESIDUOS DE ASERRÍN Y POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD DE RECICLADO PRIMARIO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 25 de julio de 2013.



**María Eugenia Guerra Salazar**

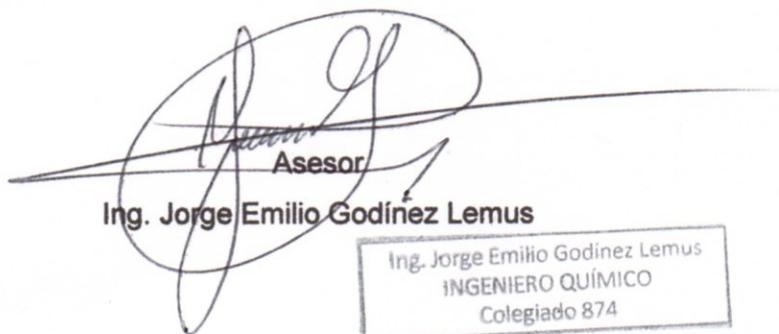


Guatemala 04 de Agosto 2014

Ingeniero  
Víctor Manuel Monzón Valdez  
Director  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería  
Presente.

Por este medio hago constar que he revisado y aprobado el informe final de trabajo de graduación con el tema de **"EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN ADECUADOS PARA EL PROCESAMIENTO DE LA MADERA PLÁSTICA, FABRICADA A PARTIR DE RESIDUOS DE ASERRÍN Y POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD DE RECICLADO PRIMARIO."** Elaborado por María Eugenia Guerra Salazar que se identifica con carné 2008-15371.

Atentamente.

  
Asesor  
Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus

Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus  
INGENIERO QUÍMICO  
Colegiado 874



ACAAI

Agencia Centroamericana de Acreditación de  
Programas de Ingeniería y de Ciencias





Guatemala, 19 de agosto de 2014  
Ref. EIQ.TG-IF.029.2014

Ingeniero  
**Víctor Manuel Monzón Valdez**  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **097-2013** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

**INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN**

Solicitado por la estudiante universitaria: **María Eugenia Guerra Salazar**.  
Identificada con número de carné: **2008-15371**.

Previo a optar al título de **INGENIERA QUÍMICA**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

**EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN ADECUADOS PARA EL PROCESAMIENTO DE LA MADERA PLÁSTICA, FABRICADA A PARTIR DE RESIDUOS DE ASERRÍN Y POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD DE RECICLADO PRIMARIO**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Jorge Emilio Godínez Lemus**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

  
Inga. Mercedes Esther Roguel Chavez  
COORDINADORA DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





Ref.EIQ.TG.243.2014

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **MARÍA EUGENIA GUERRA SALAZAR** titulado: "**EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN ADECUADOS PARA EL PROCESAMIENTO DE LA MADERA PLÁSTICA, FABRICADA A PARTIR DE RESIDUOS DE ASERRÍN Y POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD DE RECICLADO PRIMARIO**". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, noviembre 2014

Cc: Archivo  
VMMV/ale





DTG. 612.2014

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN ADECUADOS PARA EL PROCESAMIENTO DE LA MADERA PLÁSTICA, FABRICADA A PARTIR DE RESIDUOS DE ASERRÍN Y POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD DE RECICLADO PRIMARIO**, presentado por la estudiante universitaria **María Eugenia Guerra Salazar**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno  
Decano en Funciones

Guatemala, 7 de noviembre de 2014

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por haberme guiado a lo largo de mi carrera, darme sabiduría y entendimiento para lograr mis metas
- Mi madre** Ma. Eugenia de Guerra, por su apoyo y amor incondicional, por estar siempre a mi lado siempre en cada circunstancia (q.e.p.d.).
- Mi padre** Arturo Guerra, por su amor y apoyo incondicional (q.e.p.d.).

## **AGRADECIMIENTOS A:**

- Dios** Por haberme guiado a lo largo de mi carrera, darme sabiduría y entendimiento para lograr mis metas.
- Mi hermano** Arturo Guerra, por ser un pilar fundamental durante este proceso, por su amor y apoyo incondicional en cada momento para poder culminar mi carrera.
- Mi hermana** Waleska Guerra, por su amor, disposición y apoyo incondicional.
- Mis cuñados** Lucía Alvarado, por sus consejos y apoyo en estos años, Ronald Barrios, por su apoyo y cariño
- Mis sobrinos** Carlos, Ronald, Mely y Emily Barrios, Richie, Dulce y Zoe Guerra, por darme inspiración y ánimos cuando lo necesité.
- Mi tía** Dora Salazar, por su apoyo y cariño.
- Mi asesor** Ing. Jorge Godínez, por su apoyo, tiempo y enseñanzas.

## **Mis amigos**

A cada uno de ustedes que estuvieron apoyándome y animándome incondicionalmente en el transcurso de este camino.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	III
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
Hipótesis.....	XVI
INTRODUCCIÓN .....	XVII
1. ANTECEDENTES .....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Madera .....	3
2.1.1. Propiedades comunes y específicas de la madera .....	3
2.1.2. Propiedades mecánicas de la madera.....	4
2.1.3. Propiedades físicas .....	5
2.2. Polietileno de baja densidad (PEBD).....	9
2.2.1. Aplicaciones.....	12
2.3. Termoplástico .....	12
2.4. Wood Plastic Composite (WPC).....	13
2.4.1. Características del WPC.....	13
2.4.2. Ventajas del WPC.....	14
2.4.3. Propiedades mecánicas .....	15

3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	19
3.1.	Variables .....	19
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	20
3.3.	Recursos humanos disponibles .....	20
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	21
3.4.1.	Material y equipo para la elaboración de madera plástica .....	21
3.4.2.	Equipo para determinar los parámetros .....	21
3.5.	Técnica cuantitativa.....	22
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información .....	23
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	25
3.8.	Análisis estadístico.....	27
3.8.1.	Análisis de varianza .....	27
3.8.2.	Parámetros experimentales.....	29
3.8.3.	Parámetros respuesta .....	29
3.9.	Plan de análisis de los resultados .....	29
3.9.1.	Métodos y modelos de los datos según tipo de variables .....	29
4.	RESULTADOS.....	33
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....	49
	CONCLUSIONES.....	53
	RECOMENDACIONES .....	55
	BIBLIOGRAFÍA.....	57
	APÉNDICE .....	59

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Partes de un trozo de madera.....	4
2.	Cortezas de la madera.....	6
3.	Molécula ramificada de polietileno.....	9
4.	Cadena del polietileno de baja densidad.....	10
5.	Fórmulas para el cálculo de cuadrados.....	28
6.	Densidad en función del tiempo de residencia en el horno para probetas de madera plástica, elaboradas con una formulación de 30 % de residuos de aserrín y 70 % de polietileno reciclado de baja densidad.....	33
7.	Densidad en función del tiempo de residencia en el horno para probetas de madera plástica, elaboradas con una formulación de 40 % de residuos de aserrín y 60 % de polietileno reciclado de baja densidad.....	34
8.	Densidad en función del tiempo de residencia en el horno para probetas de madera plástica, elaboradas con una formulación de 50 % de residuos de aserrín y 50 % de polietileno reciclado de baja densidad.....	35
9.	Fuerza de ruptura en función del tiempo de residencia en el horno para probetas de madera plástica elaboradas con una formulación de 30 % de residuos de aserrín y 70 % de polietileno reciclado de baja densidad.....	36

10.	Fuerza de ruptura en función del tiempo de residencia en el horno para probetas de madera plástica, elaboradas con una formulación de 40 % de residuos de aserrín y 60 % de polietileno reciclado de baja densidad .....	37
11.	Fuerza de ruptura en función del tiempo de residencia en el horno para probetas de madera plástica, elaboradas con una formulación de 50 % de residuos de aserrín y 50 % de polietileno reciclado de baja densidad .....	38
12.	Temperatura de inflamación en función del tiempo de residencia en el horno para probetas de madera plástica, elaboradas con una formulación de 30 % de residuos de aserrín y 70 % de polietileno reciclado de baja densidad .....	39
13.	Temperatura de inflamación en función del tiempo de residencia en el horno para probetas de madera plástica, elaboradas con una formulación de 40 % de residuos de aserrín y 60 % de polietileno reciclado de baja densidad .....	40
14.	Temperatura de inflamación en función del tiempo de residencia en el horno para probetas de madera plástica, elaboradas con una formulación de 50 % de residuos de aserrín y 50 % de polietileno reciclado de baja densidad .....	41
15.	Dureza Janka a diferentes tiempos de residencia en el horno para probetas de madera plástica, elaboradas con una formulación de 30 % de residuos de aserrín y 70 % de polietileno reciclado de baja densidad .....	42
16.	Dureza Janka a diferentes tiempos de residencia en el horno para probetas de madera plástica, elaboradas con una formulación de 40 % de residuos de aserrín y 60 % de polietileno reciclado de baja densidad .....	43

17.	Dureza Janka a diferentes tiempos de residencia en el horno para probetas de madera plástica, elaboradas con una formulación de 50 % de residuos de aserrín y 50 % de polietileno reciclado de baja densidad.....	44
18.	Porcentaje de humedad en función del tiempo de residencia en el horno para probetas de madera plástica, elaboradas con una formulación de 30 % de residuos de aserrín y 70 % de polietileno reciclado de baja densidad.....	45
19.	Porcentaje de humedad en función del tiempo de residencia en el horno para probetas de madera plástica elaboradas con una formulación de 40 % de residuos de aserrín y 60 % de polietileno reciclado de baja densidad.....	46
20.	Porcentaje de humedad en función del tiempo de residencia en el horno para probetas de madera plástica, elaboradas con una formulación de 50 % de residuos de aserrín y 50 % de polietileno reciclado de baja densidad.....	47

## TABLAS

I.	Propiedades de tres tipos de madera.....	6
II.	Propiedades térmicas del polietileno de baja densidad.....	11
III.	Propiedades mecánicas del polietileno de baja densidad .....	11
IV.	Variables dependientes e independientes.....	19
V.	Recolección de datos para las probetas de madera plástica elaboradas con 30 % de polietileno reciclado de baja densidad y 70 % de aserrín .....	23
VI.	Recolección de datos para las probetas de madera plástica elaboradas con 40 % de polietileno reciclado de baja densidad y 60 % de aserrín .....	24

VII.	Recolección de datos para las probetas de madera plástica elaboradas con 50 % de polietileno reciclado de baja densidad y 50 % de aserrín .....	24
VIII.	Recolección de datos de los parámetros físicomecánicos para el cálculo de la media aritmética de las probetas de madera plástica .....	25
IX.	Recolección de datos de los parámetros físicomecánicos para el cálculo de la varianza de las probetas de madera plástica.....	26
X.	Recolección de datos de los parámetros físicomecánicos para el cálculo de la desviación estándar de las probetas de madera plástica.....	26
XI.	Análisis de Varianza para el experimento de dos factores con $n$ réplicas .....	28

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>cm<sup>2</sup></b>	Centímetro cuadrado
<b>cm<sup>3</sup></b>	Centímetro cúbico
<b>WPC</b>	Compuestos de madera plástica
<b>σ</b>	Densidad
<b>F</b>	Fuerza
<b>GPa</b>	Giga Pascales
<b>°C</b>	Grados Celsius
<b>J</b>	Grados Janka
<b>g</b>	Gramos
<b>kN</b>	Kilo Newton
<b>kPa</b>	Kilo Pascales
<b>kg</b>	Kilogramos
<b>MPa</b>	Mega Pascales
<b>m<sup>3</sup></b>	Metro cúbico
<b>min</b>	Minutos
<b>N</b>	Newton
<b>LDP</b>	Polietileno de baja densidad
<b>PEBD</b>	Polietileno de baja densidad
<b>%H</b>	Porcentaje de humedad
<b>Tin</b>	Temperatura de inflamación
<b>t</b>	Tiempo
<b>Psi</b>	Unidad para medir la presión en el sistema americano de ingeniería lbf/pulg <sup>2</sup>



## GLOSARIO

<b>Anhidro</b>	Material o sustancia que no contiene agua.
<b>Aserrín</b>	Desperdicio del proceso de serrado de la madera, como el que se produce en un aserradero.
<b>ASTM</b>	Sociedad Americana para Materiales y Pruebas.
<b>Densidad</b>	Relación entre masa y volumen de un cuerpo.
<b>Dureza</b>	Oposición de los materiales a alteraciones como penetración, rayado o cortadura.
<b>Grado Janka</b>	Fuerza necesaria para introducir la mitad de una esfera en la madera. Medida de la dureza del material.
<b>Humedad</b>	Cantidad de agua, vapor de agua o cualquier otro líquido que está presente en la superficie o interior de un cuerpo.
<b>Resistencia a la ruptura</b>	Esfuerzo nominal desarrollado en un material en el punto de ruptura.

<b>Lignina</b>	Molécula polimérica presente en las paredes celulares de los tejidos que conforman la madera, que confiere características de dureza y rigidez.
<b>Material compuesto</b>	Material que se forma por la unión de dos materiales para conseguir la combinación de propiedades que no es posible obtener en los materiales originales.
<b>Ortótropo</b>	Material de dos o tres ejes ortogonales entre sí de doble simetría rotacional.
<b>Polietileno</b>	Químicamente el polímero más simple, es uno de los plásticos más comunes debido a su bajo precio y simplicidad en su fabricación.
<b>Polímero</b>	Macromoléculas formadas por la unión de moléculas más pequeñas llamadas monómeros.
<b>Reciclado primario</b>	Conversión del desecho plástico en artículos con propiedades físicas y químicas idénticas a las del material original.
<b>SPI</b>	Sociedad de la Industria de Plásticos.
<b>Tamaño de partícula</b>	Diámetro promedio de una partícula definida.
<b>Tamiz</b>	Malla que retiene y permite el paso de ciertas partículas.

**Temperatura de inflamación**

Temperatura mínima necesaria para que la materia empiece a arder y la llama se mantenga sin necesidad de añadir calor exterior.



## RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se determinaron los parámetros de operación adecuados para el proceso de fabricación de madera plástica, a partir de residuos de aserrín y polietileno de baja densidad de reciclado primario, para ello se fabricaron probetas cilíndricas, de 10 centímetros de diámetro y 1,27 centímetros de grosor, las mezclas se prepararon a partir de aserrín y polímero a tres distintas formulaciones, utilizando el método de compresión en caliente a una presión de 10 toneladas, y tres tiempos de retención en el horno a una temperatura de 190 °C.

Las probetas obtenidas se sometieron a las pruebas fisicomecánicas para determinar los parámetros de densidad (ASTM D2395-07), fuerza de ruptura (ASTM D143-09), dureza Janka (ASTM D143-09), temperatura de inflamación (ASTM 1929-12), humedad (ASTM D4442-07). Con los resultados obtenidos se construyeron gráficas que muestran el comportamiento de las propiedades fisicomecánicas del material terminado, en función del tiempo de retención en el horno y de la formulación utilizada. Se encontró que la densidad, temperatura de inflamación y la humedad, no sigue un patrón de comportamiento predecible en cuanto a las variables independientes, mientras que para la fuerza de ruptura una formulación con la mayor cantidad de polímero presenta la mejor resistencia, solo una formulación de las tres estudiadas pasó la prueba Janka.

Al realizar un análisis estadístico de varianza (ANDEVA), se concluye que la formulación de la mezcla es el único parámetro que influye sobre las

propiedades fisicomecánicas de la madera plástica, en especial en la fuerza de ruptura.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Evaluar los parámetros de operación adecuados para el procesamiento de la madera plástica, fabricada a partir de residuos de aserrín y polietileno de baja densidad de reciclado primario.

### **Específicos**

1. Evaluar el efecto del porcentaje del polietileno de baja densidad en la mezcla con residuos de aserrín sobre las propiedades de la madera plástica como producto terminado.
2. Evaluar el efecto del tiempo de residencia en el horno sobre las propiedades de la madera plástica como producto final.
3. Evaluar el efecto de la temperatura de horneado sobre las propiedades de la madera plástica como producto final.
4. Evaluar las propiedades fisicomecánicas de la madera plástica: densidad, temperatura de inflamación, ruptura y dureza.

## Hipótesis

### Hipótesis científica

Es posible utilizar polietileno de baja densidad de reciclado primario y residuos de aserrín para fabricar madera plástica, determinar las formulaciones adecuadas y los parámetros adecuados de operación para su procesamiento: tiempo, presión y temperatura dentro del horno.

### Hipótesis estadística

#### Hipótesis nulas

$H_0$ : no existen diferencias significativas en las propiedades de la madera plástica con la variación de la formulación.

$H_i$ : no existe diferencia significativa en las propiedades de la madera plástica al variar el tiempo de residencia en el horno.

$$\mu_1 = \mu_2$$

#### Hipótesis alternas

$H_a$ : existen diferencias significativas en las propiedades de la madera plástica con la variación de la formulación.

$H_{a1}$ : existen diferencias significativas en las propiedades de la madera plástica al variar el tiempo de residencia en el horno.

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

## INTRODUCCIÓN

La palabra Guatemala proviene de náhuatl *Quauhtlemallan* que significa lugar de muchos árboles, a pesar de ser un país con una extensión territorial pequeña cuenta con una variedad climática, producto de su relieve montañoso, tiene una tierra con alto potencial forestal la cual es explotada significativamente pero no aprovechada en su totalidad. Las industrias forestales tienen la característica de producir volúmenes grandes de residuos durante el proceso de explotación y elaboración de sus productos, entre estos residuos esta el aserrín.

Existe una serie de vías para el aprovechamiento de residuos forestales tales como el aserrín, una de las opciones es la madera plástica que es un material elaborado a partir de mezclas de polímero termoformable y residuos del proceso de madera, que se caracteriza por su homogeneidad y alta resistencia mecánica así como su resistencia a las condiciones climatológicas.

Para la elaboración de madera plástica pueden utilizarse métodos como la extrusión, prensados y compresión, las características de este material es que es mucho más resistente a la intemperie, que la madera tratada y los polímeros hacen que el producto tenga mayor resistencia y flexibilidad.

La tecnología de la madera plástica no es común en Guatemala y la mayoría de estudios se han realizado en países asiáticos como Corea, China y en Latinoamérica, en países como Chile y Brasil, por lo que el presente trabajo de graduación contribuirá a la introducción de esta tecnología en la agroindustria nacional.



## 1. ANTECEDENTES

Actualmente en Guatemala existe una empresa llamada Maderplast S. A. en la cual se elabora un producto llamado madera plástica, es un producto hecho con plástico reciclado que sirve como sustituto de la madera natural. El proceso de producción comienza con la recolección del plástico en los centros de acopio y en los basureros legales alrededor del territorio nacional. Una vez hecha la recolección, se separan los termoplásticos y se les somete a un proceso de calentamiento y moldeo. Con esta transformación se obtiene un producto semejante a la madera natural, que puede ser empleado de la misma manera y es elaborado cien por ciento con plástico.

En febrero de 2014 se realizó la publicación del trabajo de graduación del ingeniero Mauricio Rivera Tello, de la Universidad de San Carlos de Guatemala en el cual realizó la determinación de los parámetros adecuados para la elaboración de madera plástica por compresión en caliente de mezclas de desechos de madera teca (*Tectona Grandis*) reducidos a aserrín y polipropileno, utilizando tres proporciones de materia prima, 40, 50 y 60 por ciento en peso de polipropileno, con tres tiempos distintos de residencia en el horno, 35, 45 y 55 minutos a 140, 160 y 180 grados Celsius de temperatura en el horno y a 2, 4 y 6 toneladas de presión de compresión. Se realizó pruebas fisicomecánicas como densidad, temperatura de inflamación, dureza en escala de Mohs y módulo de ruptura.

Al realizar estas pruebas se concluyó que la formulación de 50 % de aglutinante obtuvo las mejores propiedades fisicomecánicas, siendo este un proyecto exitoso.

Con base en el estudio realizado por el Ing. Riviera Tello y siendo este el primer producto realizado con la mezcla de aserrín y un polímero, se decidió ampliar la investigación utilizando un nuevo polímero para mezclar con los residuos de aserrín, por las propiedades termo formables y por la abundancia en los desperdicios de empaques plásticos se decidió utilizar polietileno de baja densidad y de reciclado primario, evaluando las propiedades físicomecánicas del producto final con el objetivo de obtener un producto apto para cualquier aplicación comercial.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Madera**

La madera es un material ortótropo, con distinta elasticidad según la dirección de deformación, encontrado como principal contenido del tronco de un árbol. Los árboles se caracterizan por tener troncos que crecen cada año, formando anillos, y que están compuestos por fibras de celulosa unidas con lignina. Las plantas que no producen madera son conocidas como herbáceas.

Una vez cortada y seca, la madera se utiliza para distintos fines en distintas áreas:

- Fabricación de pulpa o pasta, materia prima para hacer papel.
- Alimentar el fuego, en este caso se denomina leña y es una de las formas más simples de biomasa.
- Menaje: vajillas, cuberterías, entre otros.
- Ingeniería, construcción y carpintería.
- Medios de transporte: barcos, carruajes.

#### **2.1.1. Propiedades comunes y específicas de la madera**

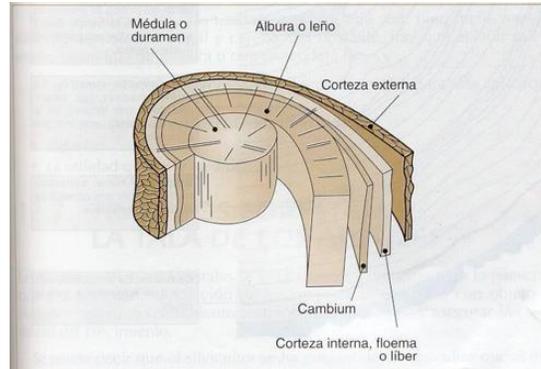
- Resistencia: especialmente cuando los esfuerzos son paralelos a la dirección de la fibra.
- Flexibilidad: sobre todo en maderas blandas lo que permite darle curvatura.

Esto es una ventaja cuando se trabaja con madera laminada.

- Aislante térmico, eléctrico y acústico.
- Baja relación peso/resistencia.
- Facilidad para ser trabajada (corte, cepillado, unión con tornillos, clavos, adhesivos).
- Mayor resistencia para colapsar ante el fuego que una estructura de metal.

Al hacer un corte transversal de un tronco de madera, se aprecia en la parte más externa, en la periferia, la zona que se llama Albura. Aquí los anillos de crecimiento son más separados, el color es más claro que en el centro, la madera en esta zona es menos dura, es la parte más reciente del árbol.

Figura 1. **Partes de un trozo de madera**



Fuente: RODWELL, Roger M. *Handbook of wood chemistry and wood composites*. p. 2.

### 2.1.2. **Propiedades mecánicas de la madera**

Las propiedades de las maderas dependen de muchos factores tales como: tipo y edad del árbol, condiciones de crecimiento como el terreno y el clima, entre otros. Como en todo material, varias son las propiedades a tener en cuenta a la hora de emplearlo, y que dependerán del fin que se quiera darle.

Desde tiempos remotos la madera se ha usado en la construcción, como un material eficiente, debido a las ventajosas características y propiedades que posee, entre otras principales se enuncian las siguientes.

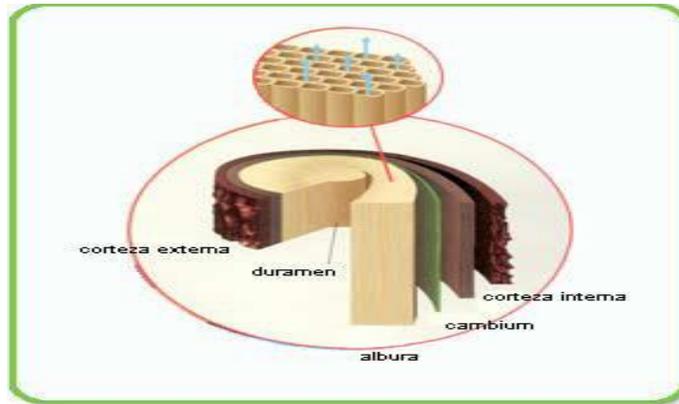
### **2.1.3. Propiedades físicas**

Las propiedades físicas que se definen para las maderas son: humedad, peso específico o densidad, la contracción e hinchamiento.

- La humedad: es la cantidad de agua que tiene la madera en su estructura. Esta agua puede aparecer formando parte de las células de la constitución leñosa, impregnando la materia leñosa o dentro del sistema vascular del árbol. El agua del sistema vascular desaparece con el tiempo, el agua de constitución leñosa solo desaparece por combustión, mientras que el agua de impregnación variará según la higroscopia de la madera. La humedad de la madera está directamente relacionada con el peso, y afecta a otras propiedades físicas y mecánicas. Por eso, es importante conocer el contenido de humedad de una madera para las condiciones en la que va a emplearse, y cómo reaccionará ante la pérdida o ganancia de agua.

Cuando la madera húmeda comienza a secarse va perdiendo peso y se contrae hasta un límite en el que no puede disminuir más su grado de humedad, para la temperatura a la que se encuentre. Si se desea eliminar todo el contenido posible de agua, es necesario llevar a cabo un secado en el laboratorio, que se basa en someter la madera a una temperatura de 105 °C hasta que esta alcance un peso constante. En ese momento se dice que la madera está totalmente seca o anhidra, y si se desea disminuir su contenido en agua es necesario combustionarla.

Figura 2. **Cortezas de la madera**



Fuente: RODWELL, Roger M. *Handbook of wood chemistry and wood composites*. p. 2.

Tabla I. **Propiedades de tres tipos de madera**

	Flexión	Tracción		Compresión		Cortante	Módulo de elasticidad
		Paralela	Perpendicular	Paralela	Perpendicular		
Madera	120	120	1,5	110	28	12	110000
Hormigón	80	6		80		6	200000
Acero	170	1700		1700		1000	2100000

Fuente: RODWELL, Roger M. *Handbook of wood chemistry and wood composites*. p. 3.

- Elasticidad–deformabilidad: bajo cargas pequeñas, la madera se deforma de acuerdo con la Ley de Hooke, o sea, que las deformaciones son proporcionales a las tensiones. Cuando se sobrepasa el límite de proporcionalidad la madera se comporta como un cuerpo plástico y se produce una deformación permanente. Al seguir aumentando la carga, se produce la rotura. Este módulo dependerá de la clase de madera, del contenido de humedad, del tipo y naturaleza de las acciones, de la dirección de aplicación de los esfuerzos y de la duración de los mismos. El

valor del módulo de elasticidad E en el sentido transversal a las fibras será de 4 000 a 5 000 Kg / cm<sup>2</sup>. El valor del módulo de elasticidad E en el sentido de las fibras será de 80 000 a 180 000 Kg / cm<sup>2</sup>.

- Flexibilidad: es la propiedad que tienen algunas maderas de poder ser dobladas o ser curvadas en su sentido longitudinal, sin romperse. Si son elásticas recuperan su forma primitiva cuando cesa la fuerza que las ha deformado. La madera presenta especial aptitud para sobrepasar su límite de elasticidad por flexión sin que se produzca rotura inmediata, siendo esta una propiedad que la hace útil para la curvatura (muebles, ruedas, cerchas, instrumentos musicales, entre otros).

La madera verde, joven, húmeda o calentada, es más flexible que la seca o vieja y tiene mayor límite de deformación. La flexibilidad se facilita calentando la cara interna de la pieza (produciéndose contracción de las fibras interiores) y, humedeciendo con agua la cara externa (produciéndose un alargamiento de las fibras exteriores) La operación debe realizarse lentamente. Actualmente esta propiedad se incrementa, sometiéndola a tratamientos de vapor.

- Maderas flexibles: fresno, olmo, abeto, pino.
- Maderas no flexibles: encina, arce, maderas duras en general.
- Dureza: es una característica que depende de la cohesión de las fibras y de su estructura. Se manifiesta en la dificultad que pone la madera de ser penetrada por otros cuerpos (clavos, tornillos, entre otros) o a ser trabajada (cepillo, sierra, gubia, formón). La dureza depende de la especie, de la zona del tronco, de la edad. En general suele coincidir que

las más duras son las más pesadas. El duramen es más duro que la albura. Las maderas verdes son más blandas que las secas. Las maderas fibrosas son más duras. Las maderas más ricas en vasos son más blandas. Las maderas más duras se pulen mejor.

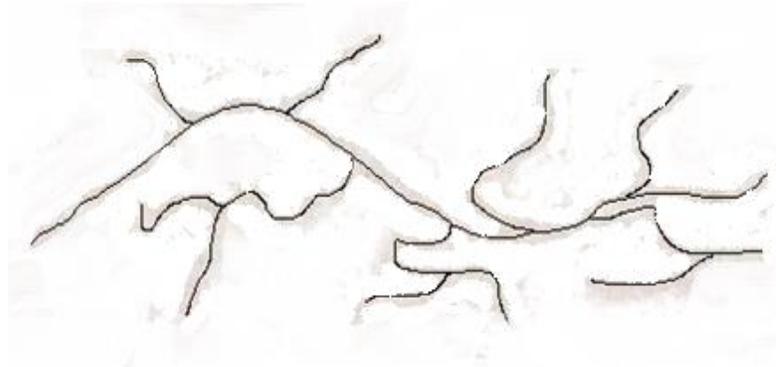
- Cortadura: es la resistencia ofrecida frente a la acción de una fuerza que tiende a desgajar o cortar la madera en dos partes, cuando la dirección del esfuerzo es perpendicular a la dirección de las fibras. Si la fuerza es máxima en sentido perpendicular a las fibras será cortadura y si es mínima en sentido paralelo a las mismas será desgarramiento.
- Hendibilidad: es la resistencia ofrecida frente a la acción de una fuerza que tiende a desgajar o cortar la madera en dos partes cuando la dirección de los esfuerzos es paralela a la dirección de las fibras.
- Resistencia al choque: indica el comportamiento de la madera al ser sometida a un impacto. La resistencia es mayor, en el sentido axial de las fibras y menor en el transversal, o radial. En la resistencia al choque influyen: el tipo de madera, el tamaño de la pieza, la dirección del impacto con relación a la dirección de las fibras, la densidad y la humedad de la madera, entre otros.
- Resistencia a la compresión: la madera, en la dirección de las fibras, resiste menos a compresión que a tracción, siendo la relación del orden de 0,50, aunque variando de una especie a otra de 0,25 a 0,7. La alta resistencia a la compresión es necesaria para cimientos y soportes en construcción. La resistencia a la flexión es fundamental en la utilización de madera en estructuras, como viguetas, travesaños y vigas de todo tipo. Muchos tipos de madera que se emplean por su alta resistencia a la

flexión presentan alta resistencia a la compresión y viceversa; pero la madera de roble, por ejemplo, es muy resistente a la flexión pero más bien débil a la compresión, mientras que la de secuoya es resistente a la compresión y débil a la flexión.

## 2.2. Polietileno de baja densidad (PEBD)

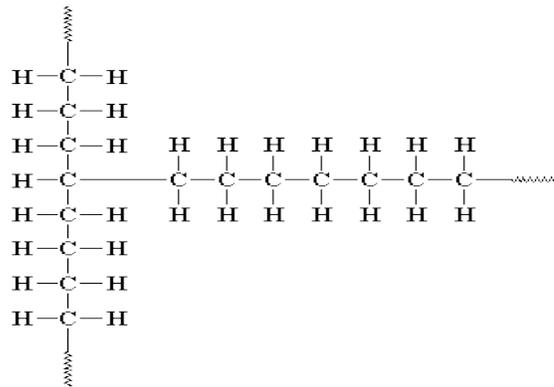
El polietileno de baja densidad o PEBD (LDPE en inglés) es un polímero de cadena ramificada, por lo que su densidad es más baja.

Figura 3. **Molécula ramificada de polietileno**



Fuente: elaboración propia, utilizando software Chems sketch.

Figura 4. **Cadena del polietileno de baja densidad**



Fuente: elaboración propia, utilizando software Chems sketch.

Los objetos fabricados con LDPE se identifican, en el sistema de identificación americano SPI (Society of the Plastics Industry), con el siguiente símbolo en la parte inferior o posterior.

El polietileno de baja densidad es un termoplástico comercial, semicristalino (un 50 % típicamente), transparente y más bien blanquecino, flexible, liviano, impermeable, inerte (al contenido), no tóxico, tenaz (incluso a temperaturas bajas), con poca estabilidad dimensional, pero fácil procesamiento y de bajo coste. Además, posee excelentes propiedades eléctricas (buen aislante eléctrico) pero una débil resistencia a las temperaturas. Su resistencia química también es muy buena pero es propenso al agrietamiento bajo carga ambiental. Su resistencia a los rayos UV es mediocre y tiene propiedades de protección débiles, salvo con el agua. Buena dureza y resistente al impacto en bajas temperaturas. Aunque se pueden resumir todas las principales propiedades en una serie de tablas que se muestran a continuación.

Tabla II. **Propiedades térmicas del polietileno de baja densidad**

<b>PROPIEDADES TÉRMICAS</b>	
Calor específico ( $\text{J K}^{-1} \text{kg}^{-1}$ )	1 900-2 300
Coefficiente de expansión ( $\times 10^6 \text{ K}^{-1}$ )	100-200
Conductividad térmica a 23 °C ( $\text{W/m K}$ )	0,33
Temperatura máxima de utilización (°C)	50-90
Temperatura de reblandecimiento (°C)	110
Temperatura de cristalización (°C)	105-110
Temperatura mínima de utilización (°C)	-60

Fuente: KIRK, Raymond E. Enciclopedia de tecnología química. p. 301.

Tabla III. **Propiedades mecánicas del polietileno de baja densidad**

<b>Propiedades Mecánicas</b>	
Alargamiento a la rotura ( % )	400
Dureza - Rockwell	41 - 46
Módulo de tracción (GPa )	0,1 - 0,3
Resistencia a la Tracción ( MPa )	may-25
Resistencia al impacto Izod ( $\text{J m}^{-1}$ )	>1 000

Fuente: KIRK, Raymond E. Enciclopedia de tecnología química. p. 302.

### **2.2.1. Aplicaciones**

Los polímeros de polietileno de baja densidad (LDPE) utilizados en la industria presentan buenas propiedades mecánicas. Se trata de polímeros con buena procesabilidad y resistencia al impacto, al rasgado y al punzonado. Sus aplicaciones más importantes son:

- Bolsas y elementos para publicidad: se pueden encontrar varios tipos de bolsas fabricadas a partir de polietileno de baja densidad.

### **2.3. Termoplástico**

Un termoplástico es un plástico que a temperaturas relativamente altas se vuelve deformable o flexible, se derrite cuando se calienta y se endurece en un estado de transición vítrea cuando se enfría lo suficiente. La mayor parte de los termoplásticos son polímeros de alto peso molecular, los cuales poseen cadenas asociadas por medio de fuerzas de Van der Waals débiles (polietileno); fuertes interacciones dipolo-dipolo y enlace de hidrógeno, o incluso anillos aromáticos apilados (poliestireno). Los polímeros termoplásticos difieren de los polímeros termoestables o termofijos en que después de calentarse y moldearse pueden recalentarse y formar otros objetos.

Sus propiedades físicas cambian gradualmente si se funden y se moldean varias veces (historial térmico), generalmente disminuyendo estas propiedades al debilitar los enlaces. Los más usados son: el polietileno (PE), el polipropileno (PP), el polibutileno (PB), el poliestireno (PS), el polimetilmetacrilato (PMMA), el policloruro de vinilo (PVC), el politereftalato de etileno (PET), el teflón (o politetrafluoretileno, PTFE) y el nailon (un tipo de poliamida).

Se diferencian de los termoestables o termofijos (baquelita, goma vulcanizada) en que estos últimos no funden al elevarlos a altas temperaturas, sino que se queman, siendo imposible volver a moldearlos. Muchos de los termoplásticos conocidos pueden ser resultado de la suma de varios polímeros, como es el caso del vinilo, que es una mezcla de polietileno y polipropileno.

## **2.4. Wood Plastic Composite (WPC)**

El Wood Plastic Composite también conocido por su abreviatura (WPC) es un material ecológico, compuesto por la mezcla de: materiales celulósicos y materiales termoplásticos.

Materiales celulósicos 60 %. Principalmente pino y bambú. En este caso la procedencia de estas materias celulósicas en forma de aserrín, provienen de la recuperación y reciclaje de empresas transformadoras de madera o dedicadas al mantenimiento de bosques, entre las cuales se pueden destacar (fabricantes de muebles y puertas de madera, entre otros.). Materiales termoplásticos 40 % (polipropileno y polietileno) principalmente. La procedencia de estos materiales está en la recuperación y reciclaje de estos polímeros y de sus productos transformados como son: botellas de plástico, bolsas de supermercado, entre otros.

### **2.4.1. Características del WPC**

El WPC está considerado actualmente como un buen sustituto de las maderas tropicales tradicionales y más aun, cuando la sociedad está cada día más sensibilizada en el aprovechamiento de los recursos naturales y la sostenibilidad del ecosistema.

Por su composición, características y propiedades, son las zonas de exterior, el lugar idóneo para la instalación del WPC, principalmente en zonas expuestas al sol y la lluvia:

- Tarimas de exterior
- Suelos para terrazas
- Jardines
- Alrededores de piscinas
- Vallas para jardín

Es en estas aplicaciones donde el WPC demuestra todas y cada una de sus ventajas.

#### **2.4.2. Ventajas del WPC**

El WPC posee unas características únicas frente a otros tipos de materiales:

- Fácil instalación.
- Resistente para exteriores (lluvia, nieve, frío, calor).
- Resistente a la humedad, no crea mohos.
- No necesita mantenimiento ni conservación tipo: aceites, barnices, ceras.
- Mantendrá la superficie completamente limpia, simplemente con aplicar agua.
- No produce astillas ni grietas.
- Resistente contra los insectos, carcoma, termitas.
- El sistema de rastrel (soporte debajo de la tarima) también fabricado en WPC garantiza la larga vida de los productos.
- Además el WPC es totalmente reciclable.

### 2.4.3. Propiedades mecánicas

- Flexibilidad: el módulo elástico en pruebas de flexión incrementa en el orden de mil MPa, la tensión incrementa en varios MPa, mientras que la flexibilidad disminuye drásticamente, por lo que el material es más frágil y menos elástico, sin embargo es más fuerte que el polímero base.
- Impacto: con una carga de más de 50 % de madera en el compuesto, para LDPE, HDPE y PP, las pruebas de impacto presentan absorción de energía en el orden de LDPE < HDPE < PP, sin embargo, prácticamente todas las muestras presentan ruptura total en pruebas realizadas. Los compuestos de madera y plástico no son aptos para aplicaciones que requieren alto desempeño en impacto. La respuesta a la propagación de una ruptura se puede estudiar por medio de la inclusión de una muesca en una probeta de ensayo; sin embargo, los resultados reportados no son de mucho mejor desempeño que la prueba tradicional. Ha sido reportado que algunas fibras, con partículas más bien alargadas que redondas, como las fibras de jute, ofrecen una resistencia ligeramente mayor a la propagación de la ruptura.
- Extrusión: la extrusión de estos compuestos es la técnica más utilizada para fabricar perfiles de este material, pero también es utilizada para realizar el compuesto, esto sucede por medio de una mezcla física, que en combinación con agentes de acoplamiento puede formar algunos enlaces químicos o formar emulsiones de forma que el material sea estable y posteriormente pueda ser inyectado o moldeado por compresión. La extrusión de los compuestos de madera y plástico presenta algunos desafíos tecnológicos respecto de la extrusión tradicional. El primer problema presente es la alimentación del material en la tolva, el polvo y

gránulos de material son alimentados en la tolva, sin embargo el polvo fino de madera tiende a conglomerarse en la boca de la tolva, que por acción del calor y de la humedad se pega y no entra al cañón y no tiene contacto con el husillo.

La extrusión puede ocurrir en un equipo de:

- Doble husillo
- Husillo sencillo

El material debe ser secado previamente a la inyección y preferentemente dosificado por robots, para asegurar la homogeneidad durante la extrusión.

La rapidez con que el husillo gira determina la tasa de material extruido por minuto, sin embargo debe tomarse en cuenta que esta tasa puede tener un máximo y una rapidez mayor solo consumiría más energía sin proveer beneficios en la cantidad de material por unidad de tiempo.

La tasa de material extruido por minuto puede incrementarse con agentes de flujo, agentes de acoplamiento y espumantes.

- Moldeo por compresión: el moldeo por compresión es el método más difundido para la producción de compuestos de madera y plástico, múltiples piezas automotrices internas (piezas que no están expuestas a la vista tanto en interiores como exteriores del automóvil) son hechas de este compuesto y moldeadas por compresión, en esta técnica son utilizadas comúnmente fibras naturales (como jute o henequén) además de la harina de madera.



### 3. DISEÑO METODOLÓGICO

#### 3.1. Variables

Las variables de medición del estudio para determinar las propiedades fisicomecánicas de la madera plástica se muestran en la siguiente tabla.

Tabla IV. **Variables dependientes e independientes**

Nombre	Unidad de medida	Símbolo	Tipo de Variable				
			Entrada	Respuesta	Dependiente	Independiente	Constante
Composición polímero	Porcentaje en Peso	%	X			X	
Temperatura de horneado	Grado Celsius	°C	X				X
Tiempo de residencia en horno	Minutos	Min	X			X	
Presión de prensado	Toneladas	Min	X				X
Densidad		kg/m <sup>3</sup>		X	X		
Humedad	Porcentaje en Peso	%		X	X		
Resistencia a la ruptura	Newton	N		X	X		
Temperatura Inflamación	Grado Celsius	°C		X	X		
Dureza	Newton	N		X	X		
Tamaño partícula		µm					X

Fuente: elaboración propia.

### **3.2. Delimitación del campo de estudio**

Se estudió la influencia de los parámetros de proceso en la fabricación de madera plástica: porcentaje en peso de polímero en la mezcla, tiempo de residencia de la mezcla en el horno, sobre las propiedades de la madera plástica como producto terminado: densidad, humedad, resistencia a la ruptura, temperatura de inflamación y dureza.

Según estudios realizados con anterioridad se ha determinado que el tamaño de la partícula adecuado para el proceso es el que pasa por tamiz 40 y retenido en el tamiz 60, según Ing. Mauricio Valentino Riviera Tello. De la misma forma se determinó que la presión de prensado adecuada es de 10 toneladas. Por medio de pruebas preliminares se estableció que la temperatura indicada para el proceso es de 190 °C y que los tiempos de retención en el horno debían ser 55, 65 y 75 minutos.

Como materia prima se utilizó polímero de reciclado primario, el cual se obtuvo de una de las recicladoras que comercializan este producto en la ciudad de Guatemala. El polímero fue mezclado con aserrín de desecho proveniente de las actividades del taller de carpintería de la Sección de Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería, donde también se llevó a cabo la parte experimental de la presente investigación.

Se fabricaron probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro y 1,27 cm de espesor.

### **3.3. Recursos humanos disponibles**

Para realizar la parte experimental de la investigación se cuenta con el Laboratorio de Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones (CII) de

la Facultad de Ingeniería, con el apoyo del Ing. Jorge Emilio Godínez, asesor del trabajo de investigación y con María Eugenia Guerra que es la investigadora de dicho proyecto.

### **3.4. Recursos materiales disponibles**

Para la elaboración de madera plástica es necesario tener el equipo y el material adecuado, los cuales se presentan a continuación.

#### **3.4.1. Material y equipo para la elaboración de madera plástica**

- Aserrín de desecho.
- Polietileno de baja densidad de reciclado primario.
- Grasa para moldes.
- Extractor de aserrín.
- Horno eléctrico.
- Molde de metal aproximadamente de 3 pulgadas de ancho por 12 de largo y ½ pulgada de grosor.
- Prensa hidráulica con capacidad de 10 toneladas.
- Tamiz 40.
- Tamiz 60.

#### **3.4.2. Equipo para determinar los parámetros**

- Balanza
- Termómetro infrarrojo
- Mufla
- Plancha eléctrica

- Pinzas
- Guantes de cuero
- Vernier eléctrico
- Balanza de humedad

### 3.5. Técnica cuantitativa

El estudio a realizarse es del tipo cuantitativo ya que se basa en el registro de los datos a recabar experimentalmente, mediante instrumentos de medición, para analizar la influencia de los parámetros de procesos sobre la calidad de la madera plástica como producto final.

- Procedimiento para medir densidad del producto  
ASTM D2395-07 ae 1: *standard methods for specific gravity of wood and wood-base materials.*
- Procedimiento para medir la humedad  
ASTM D4442-07: *standard test methods for direct moisture content measurement of wood and wood-base materials.*
- Procedimiento para medira la resistencia a la ruptura  
ASTM D143-09: *standard methods for small clear specimens of timber, section 12.*
- Procedimiento para medir la temperatura de inflamación  
ASTM 1929-12: *Standard test methods for determining ignition temperature of plastics, UNE 23010.*

- Procedimiento para medirá la dureza  
ASTM D143-09: *Standard methods for small clear specimens of timber, section 13.*

### 3.6. Recolección y ordenamiento de la información

A continuación se presenta las tablas para el registro de los datos necesarios en los cálculos de las propiedades fisicoquímicas de la madera plástica.

Tabla V. **Recolección de datos para las probetas de madera plástica elaboradas con 30 % de polietileno reciclado de baja densidad y 70 % de aserrín**

Formulación	Temperatura del horno (°C)	Tiempo de residencia en el horno (min)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Temperatura de inflamación (°C)	Dureza Janka (N)	Fuerza de ruptura (N)
F1	T1	t1	ρ11			
			ρ12			
			ρ13			
		t2	ρ21			
			ρ22			
			ρ23			
		t3	ρ31			
			ρ32			
			ρ33			

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Recolección de datos para las probetas de madera plástica elaboradas con 40 % de polietileno reciclado de baja densidad y 60 % de aserrín**

Formulación	Temperatura del horno (°C)	Tiempo de residencia en el horno (min)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Temperatura de inflamación (°C)	Dureza Janka (N)	Fuerza de ruptura (N)
F2	T1	t1	ρ11			
			ρ12			
			ρ13			
		t2	ρ21			
			ρ22			
			ρ23			
		t3	ρ31			
			ρ32			
			ρ33			

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Recolección de datos para las probetas de madera plástica elaboradas con 50 % de polietileno reciclado de baja densidad y 50 % de aserrín**

Formulación	Temperatura del horno (°C)	Tiempo de residencia en el horno (min)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Temperatura de inflamación (°C)	Dureza Janka (N)	Fuerza de ruptura (N)
F3	T1	t1	ρ11			
			ρ12			
			ρ13			
		t2	ρ21			
			ρ22			
			ρ23			
		t3	ρ31			
			ρ32			
			ρ33			

Fuente: elaboración propia.

### 3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

A continuación se presentan las tablas para el registro de los datos calculados de las propiedades fisicomecánicas de la madera plástica.

Tabla VIII. **Recolección de datos de los parámetros fisicomecánicos para el cálculo de la media aritmética de las probetas de madera plástica**

FORMULACIÓN	Temperatura del horno (°C)	Tiempo de residencia en el horno (min)	Presión de compresión (psi)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Temperatura de inflamación (°C)	Dureza Janka (N)	Fuerza de ruptura (N)
F1	T1	t1	P1	$\rho_{11}$			
				$\rho_{12}$			
				$\rho_{13}$			
F2	T1	t2	P1	$\rho_{21}$			
				$\rho_{22}$			
				$\rho_{23}$			
F3	T1	t3	P1	$\rho_{31}$			
				$\rho_{32}$			
				$\rho_{33}$			

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Recolección de datos de los parámetros físicomecánicos para el cálculo de la varianza de las probetas de madera plástica**

Formulación	Temperatura del horno (°C)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Temperatura de inflamación (°C)	Dureza Janka (N)	Fuerza de ruptura (N)
F1	T1				
	T1				
	T1				
F2	T1				
	T1				
	T1				
F3	T1				
	T1				
	T1				

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Recolección de datos de los parámetros físicomecánicos para el cálculo de la desviación estándar de las probetas de madera plástica**

Formulación	Temperatura del horno (°C)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Temperatura de inflamación (°C)	Dureza Janka (N)	Fuerza de ruptura (N)
F1	T1				
	T1				
	T1				
F2	T1				
	T1				
	T1				
F3	T1				
	T1				
	T1				

Fuente: elaboración propia.

### **3.8. Análisis estadístico**

A continuación se presenta el análisis estadístico que se utilizará para evaluar el efecto de los resultados obtenidos de la madera plástica.

#### **3.8.1. Análisis de varianza**

Se utilizó el análisis de varianza para evaluar el efecto de la formulación y el tiempo de residencia en el horno sobre las propiedades de la madera plástica. Se mantuvo constante la temperatura del horno y la presión de prensado, esto debido a consideraciones de factibilidad técnica puesto que basándose en pruebas preliminares, se estableció que una temperatura de operación cercana a la temperatura de fusión del polímero era la que mejor funcionaba, así mismo se encontró una presión de prensado adecuada de 10 toneladas.

El experimento es de dos factores, formulación y tiempo de horneado, cada factor es de tres niveles, por lo tanto se tiene un experimento factorial del tipo  $3^2$ .

Tabla XI. **Análisis de Varianza para el experimento de dos factores con  $n$  réplicas**

	Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Factor de contraste $f$
Efecto Principal	A	SSA	a-1	$s_1^2 = \frac{SSA}{a-1}$	$f_1 = \frac{s_1^2}{s^2}$
	B	SSB	b-1	$s_2^2 = \frac{SSB}{b-1}$	$f_2 = \frac{s_2^2}{s^2}$
Interacción de dos Factores	AB	SS(AB)	(a-1)(b-1)	$s_3^2 = \frac{SS(AB)}{(a-1)(b-1)}$	$f_3 = \frac{s_3^2}{s^2}$
	Error	SSE	ab(n-1)	$s^2 = \frac{SSE}{ab(n-1)}$	
	Total	SST	abn-1		

Fuente: WALPOLE, Ronald E. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. p. 234.

Figura 5. **Fórmulas para el cálculo de cuadrados**

$$SST = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{T^2}{abn} \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$SSA = \frac{\sum_{i=1}^a T_i^2}{bn} - \frac{T^2}{abn} \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$SSB = \frac{\sum_{j=1}^b T_j^2}{an} - \frac{T^2}{abn} \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$SS(AB) = \frac{\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b T_{ij}^2}{n} - \frac{\sum_{i=1}^a T_i^2}{bn} - \frac{\sum_{j=1}^b T_j^2}{an} + \frac{T^2}{abn} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Fuente: WALPOLE, Ronald E. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. p. 235.

### **3.8.2. Parámetros experimentales**

El porcentaje de mezcla (70, 60 y 50 % de polietileno en aserrín), el tiempo de residencia en el horno (55, 65 y 75 minutos), la temperatura del horno y presión de compresión.

### **3.8.3. Parámetros respuesta**

Densidad, dureza, resistencia a la ruptura y temperatura de inflamación. A partir de los datos obtenidos y aplicando un análisis estadístico de variabilidad se han establecido los parámetros adecuados de operación así como el comportamiento de las propiedades fisicomecánicas en función de la temperatura de residencia en el horno, así también la formulación empleada.

## **3.9. Plan de análisis de los resultados**

Se presenta los métodos de datos según el tipo de variables de la madera plástica.

### **3.9.1. Métodos y modelos de los datos según tipo de variables**

Objetivo Específico 1.

Evaluar el efecto de la formulación incluyendo polietileno de baja densidad sobre las propiedades de la madera plástica como producto terminado.

- El efecto de la formulación en función de las propiedades de la madera plástica se determinó en base a las 27 muestras que se realizaron, la mejor formulación es la que obtuvo mayores valores en las pruebas fisicomecánicas, dureza, resistencia a la ruptura, temperatura de inflamación.

#### Objetivo Específico 2.

Evaluar el efecto del tiempo de residencia en el horno sobre las propiedades de la madera plástica como producto final.

- El mejor tiempo de residencia en el horno se determinó comparando los tiempos que permanecía cada probeta en el horno, los parámetros adecuados vienen dados por la formulación que menos tiempo permaneció en el horno y obtuvo mayores valores en sus pruebas fisicomecánicas.

#### Objetivo Específico 3.

Evaluar el efecto de la temperatura sobre las propiedades de la madera plástica como producto final.

- Por medio de pruebas preliminares se determinó que la temperatura adecuada era de 190 °C, debido a que a temperaturas menores el polímero no se fundió y a mayores temperaturas el aserrín se quemaba, quedando así la temperatura constante a 190 °C.

#### Objetivo Específico 4.

Evaluar las propiedades fisicomecánicas de la madera plástica: densidad, temperatura de inflamación, ruptura y dureza.

- Estas propiedades se determinaron con base en las pruebas que se realizaron según normas ASTM, la mejor es la que presenta los valores mayores.

#### **3.9.2. Programas a utilizar para análisis de datos**

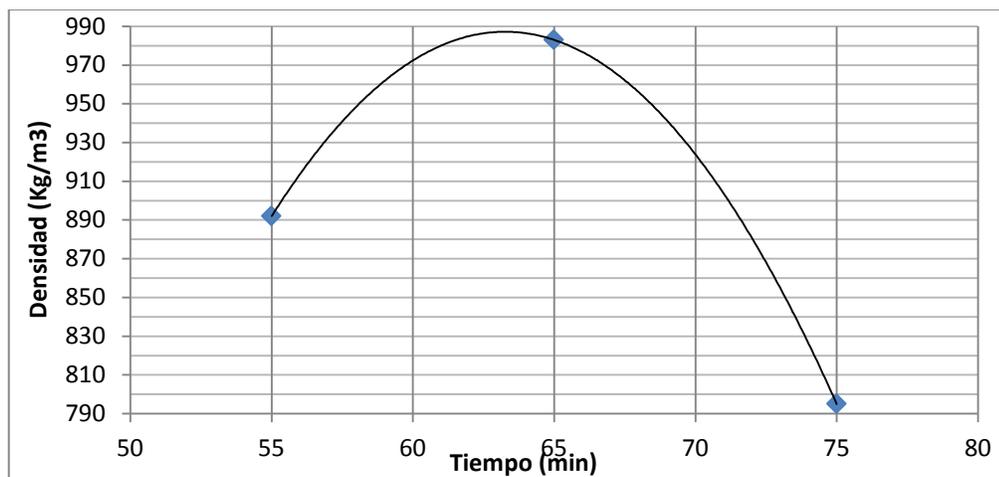
Se utilizó el programa Microsoft Excel 2010, por su amplia aplicación en el manejo de datos numéricos, ya que presenta la ventaja de poder realizar en una hoja de cálculo el análisis de varianza de los parámetros medidos en la presente investigación. (Referencia Análisis Estadístico, tabla XI).



## 4. RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados obtenidos con base en los objetivos planteados para este estudio.

Figura 6. **Densidad en función del tiempo de residencia en el horno para probetas de madera plástica, elaboradas con una formulación de 30 % de residuos de aserrín y 70 % de polietileno reciclado de baja densidad**

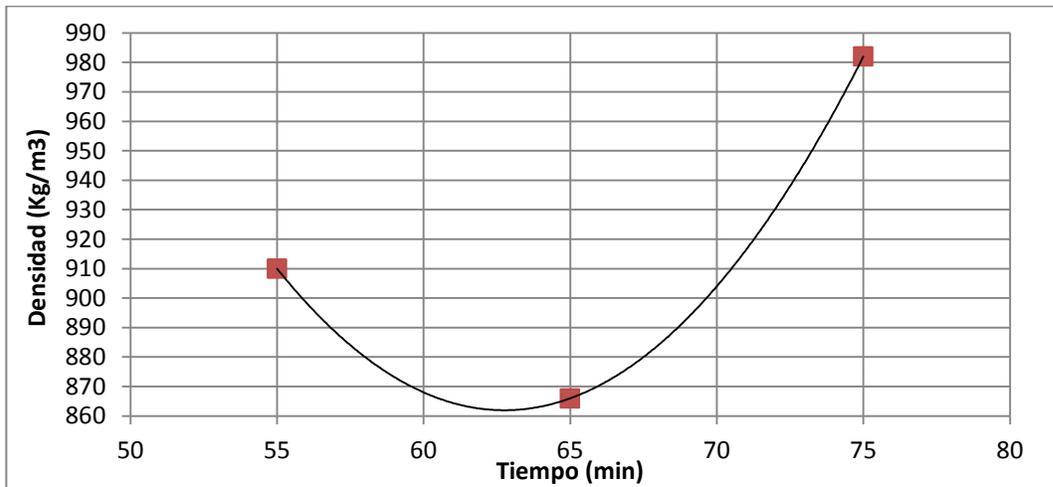


Ecuación	Coefficiente de Correlación
$\sigma = -1,395t^2 + 176,5t - 4595,6$	1

(Ecuación 5)

Fuente: elaboración propia, sección datos calculados, tabla II.

Figura 7. **Densidad en función del tiempo de residencia en el horno para probetas de madera plástica, elaboradas con una formulación de 40 % de residuos de aserrín y 60 % de polietileno reciclado de baja densidad**

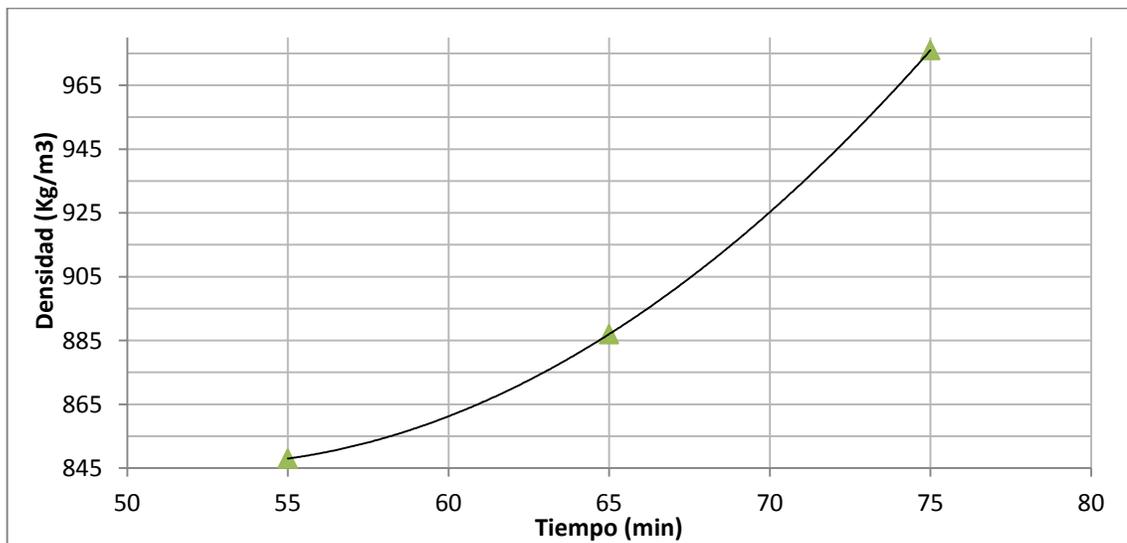


Ecuación	Coefficiente de correlación
$\sigma = 0,8t^2 - 100,4t + 4\ 012$	1

(Ecuación 6)

Fuente: elaboración propia sección datos calculados, tabla III.

Figura 8. **Densidad en función del tiempo de residencia en el horno para probetas de madera plástica, elaboradas con una formulación de 50 % de residuos de aserrín y 50 % de polietileno reciclado de baja densidad**

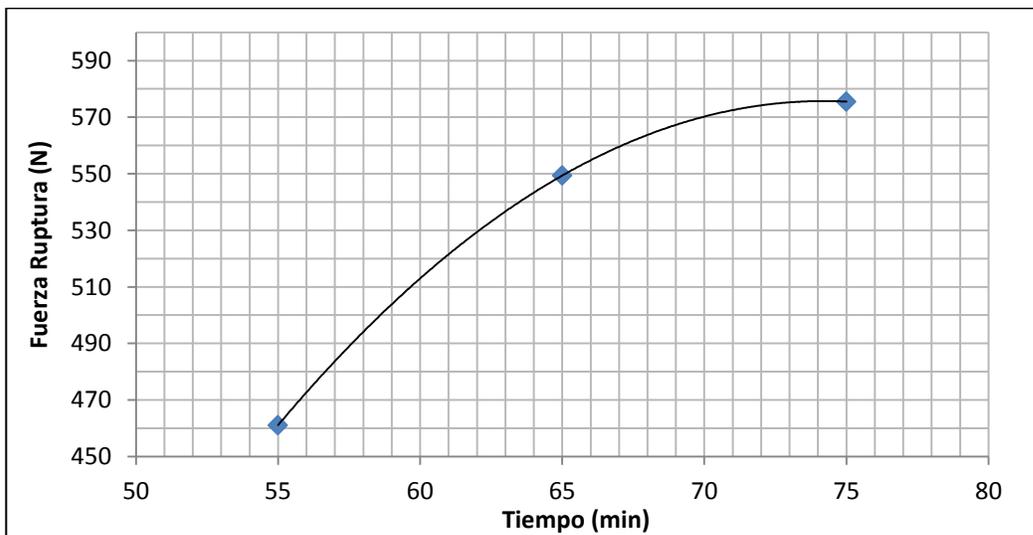


Ecuación	Coefficiente de correlación
$\sigma = 0,25t^2 - 26,1t + 1527,2$	1

(Ecuación 7)

Fuente: elaboración propia sección datos calculados, tabla IV.

Figura 9. **Fuerza de ruptura en función del tiempo de residencia en el horno para probetas de madera plástica elaboradas con una formulación de 30 % de residuos de aserrín y 70 % de polietileno reciclado de baja densidad**

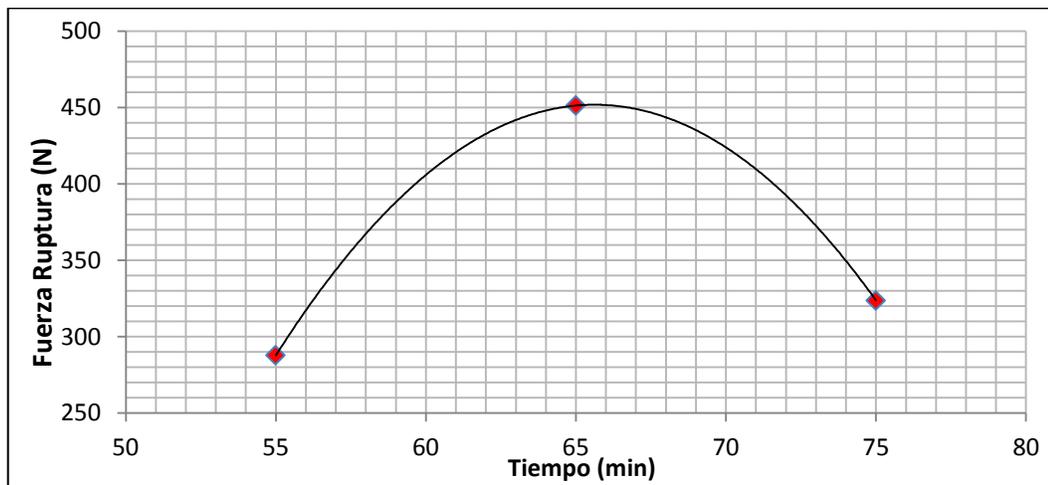


Ecuación	Coefficiente de correlación
$F = -0,3106t^2 + 46,107t - 135,1$	1

(Ecuación 8)

Fuente: elaboración propia sección datos calculados, tabla V.

Figura 10. **Fuerza de ruptura en función del tiempo de residencia en el horno para probetas de madera plástica, elaboradas con una formulación de 40 % de residuos de aserrín y 60 % de polietileno reciclado de baja densidad**

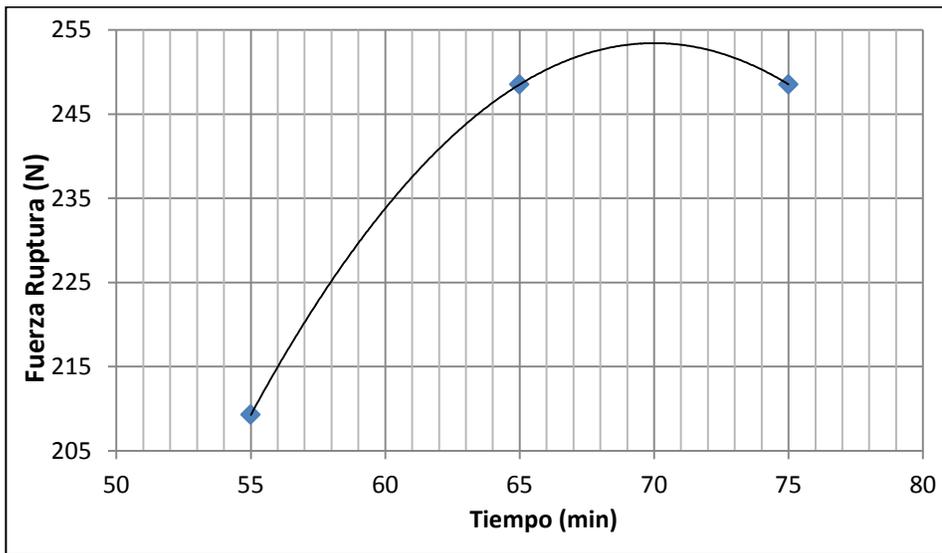


<b>Ecuación</b>	<b>Coefficiente de correlación</b>
$F = -1,4552t^2 + 190,97t - 5813,7$	1

(Ecuación 9)

Fuente: elaboración propia sección datos calculados, tabla VI.

Figura 11. **Fuerza de ruptura en función del tiempo de residencia en el horno para probetas de madera plástica, elaboradas con una formulación de 50 % de residuos de aserrín y 50 % de polietileno reciclado de baja densidad**

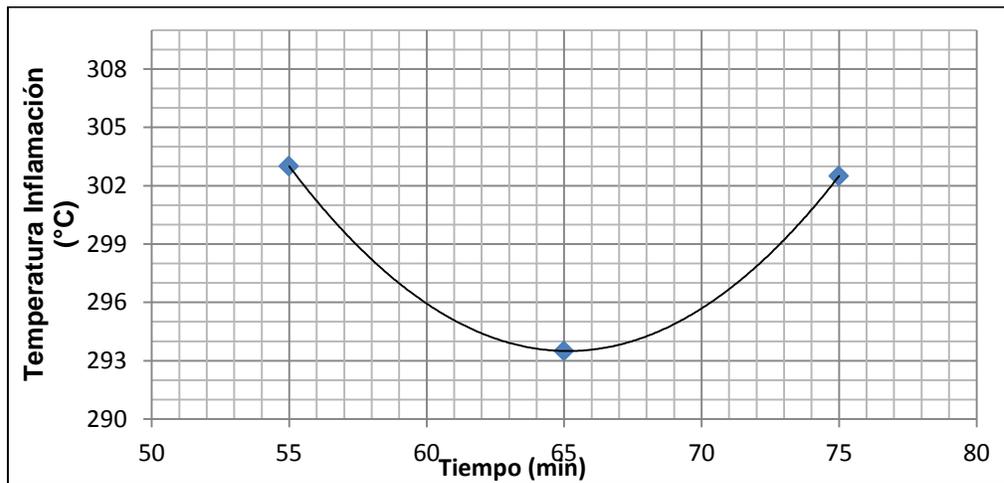


Fuente: elaboración propia sección datos calculados, tabla VII.

Ecuación	Coefficiente de correlación
$F = -0,1962t^2 + 27,468t - 707,95$	1

(Ecuación 10)

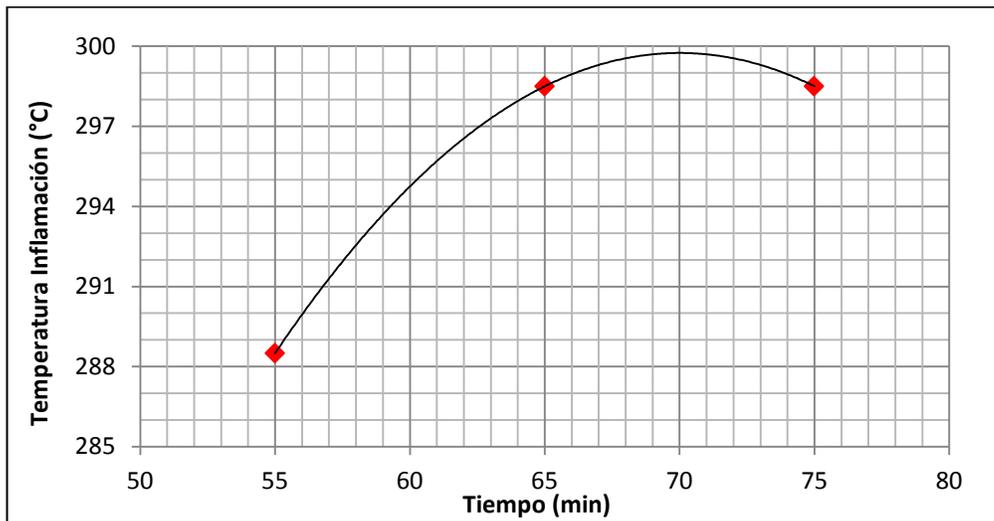
Figura 12. **Temperatura de inflamación en función del tiempo de residencia en el horno para probetas de madera plástica, elaboradas con una formulación de 30 % de residuos de aserrín y 70 % de polietileno reciclado de baja densidad**



Ecuación	Coefficiente de correlación
$T_{in} = 0,0925t^2 - 12,05t + 685,94$	1

(Ecuación 11)

Figura 13. **Temperatura de inflamación en función del tiempo de residencia en el horno para probetas de madera plástica, elaboradas con una formulación de 40 % de residuos de aserrín y 60 % de polietileno reciclado de baja densidad**

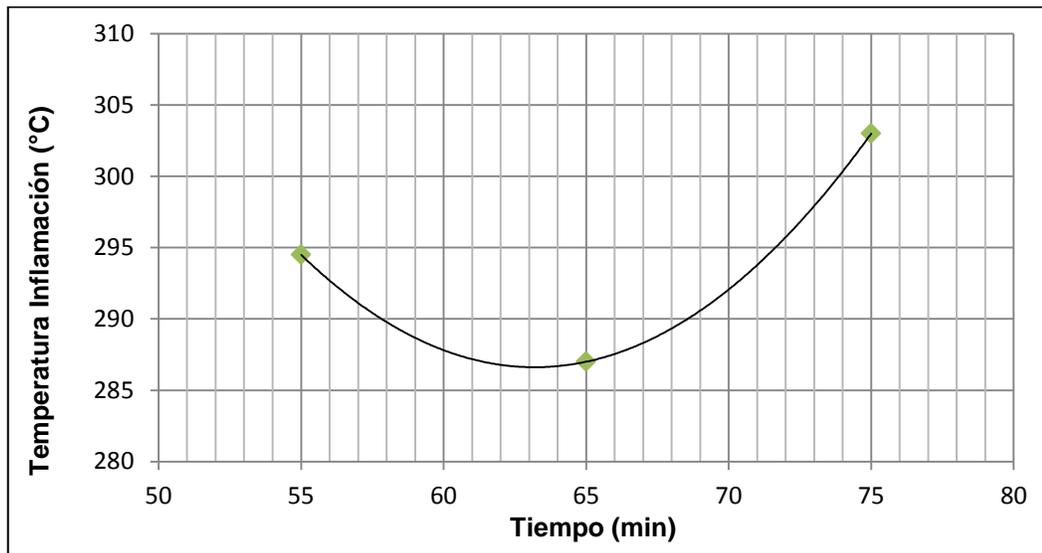


<b>Ecuación</b>	<b>Coefficiente de correlación</b>
$T_{in} = -0,05t^2 + 7t + 54,75$	1

(Ecuación 12)

Fuente: elaboración propia, sección datos calculados, tabla IX.

Figura 14. **Temperatura de inflamación en función del tiempo de residencia en el horno para probetas de madera plástica, elaboradas con una formulación de 50 % de residuos de aserrín y 50 % de polietileno reciclado de baja densidad**

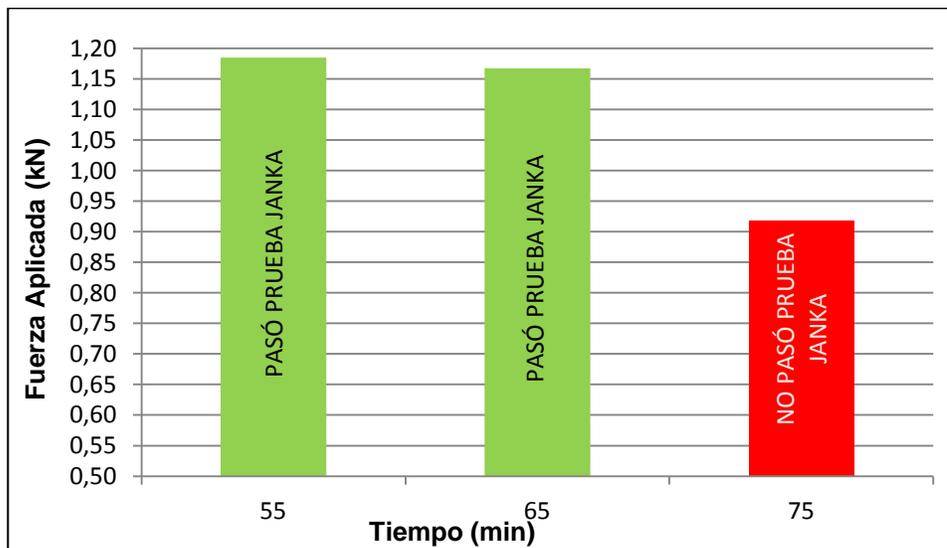


<b>Ecuación</b>	<b>Coefficiente de correlación</b>
$T_{in} = 0,1175t^2 - 14,85t + 755,81$	1

(Ecuación 13)

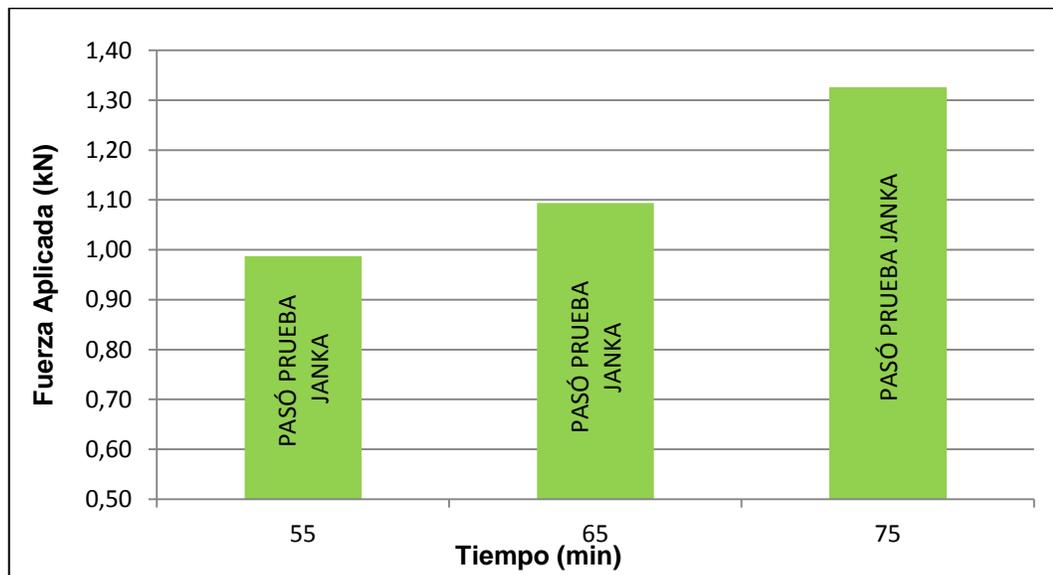
Fuente: elaboración propia, sección datos calculados, tabla X.

Figura 15. **Dureza Janka a diferentes tiempos de residencia en el horno para probetas de madera plástica, elaboradas con una formulación de 30 % de residuos de aserrín y 70 % de polietileno reciclado de baja densidad**



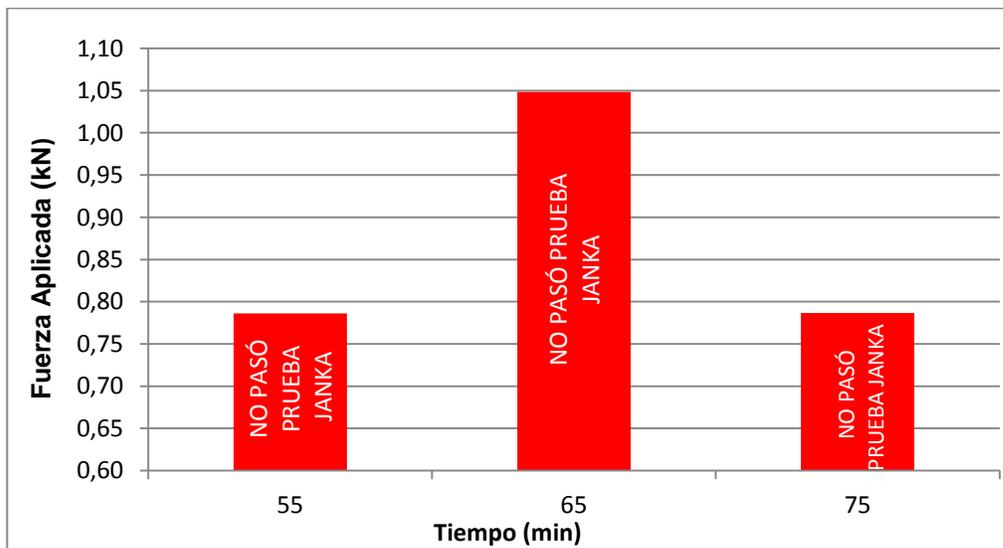
Fuente: elaboración propia, sección datos calculados, figuras 1 a la 5.

Figura 16. Dureza Janka a diferentes tiempos de residencia en el horno para probetas de madera plástica, elaboradas con una formulación de 40 % de residuos de aserrín y 60 % de polietileno reciclado de baja densidad



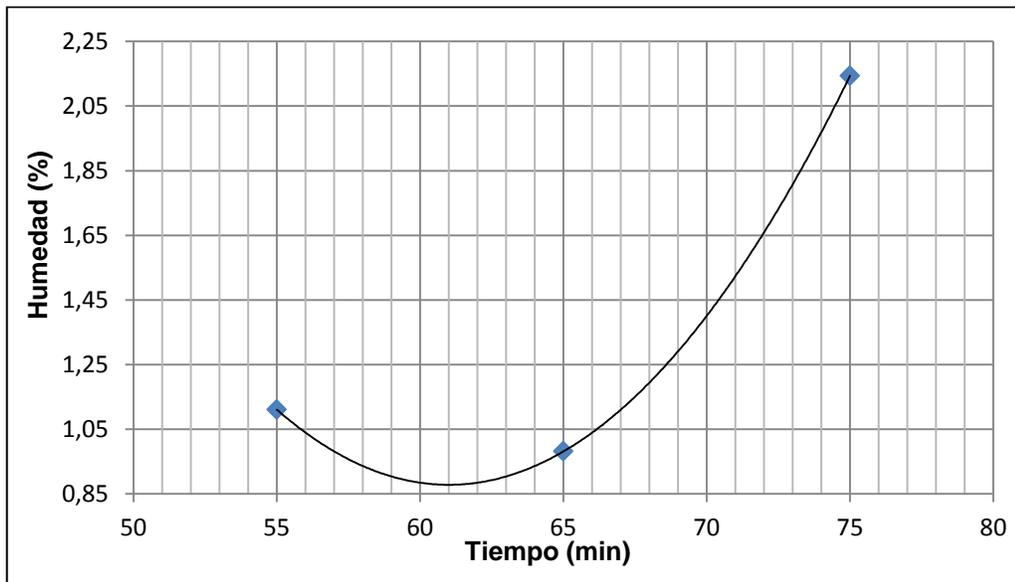
Fuente: elaboración propia, sección datos calculados, figuras 6 a la 9.

Figura 17. **Dureza Janka a diferentes tiempos de residencia en el horno para probetas de madera plástica, elaboradas con una formulación de 50 % de residuos de aserrín y 50 % de polietileno reciclado de baja densidad**



Fuente: elaboración propia, sección datos calculados, tablas XXIX a la XXXVII.

Figura 18. **Porcentaje de humedad en función del tiempo de residencia en el horno para probetas de madera plástica, elaboradas con una formulación de 30 % de residuos de aserrín y 70 % de polietileno reciclado de baja densidad**

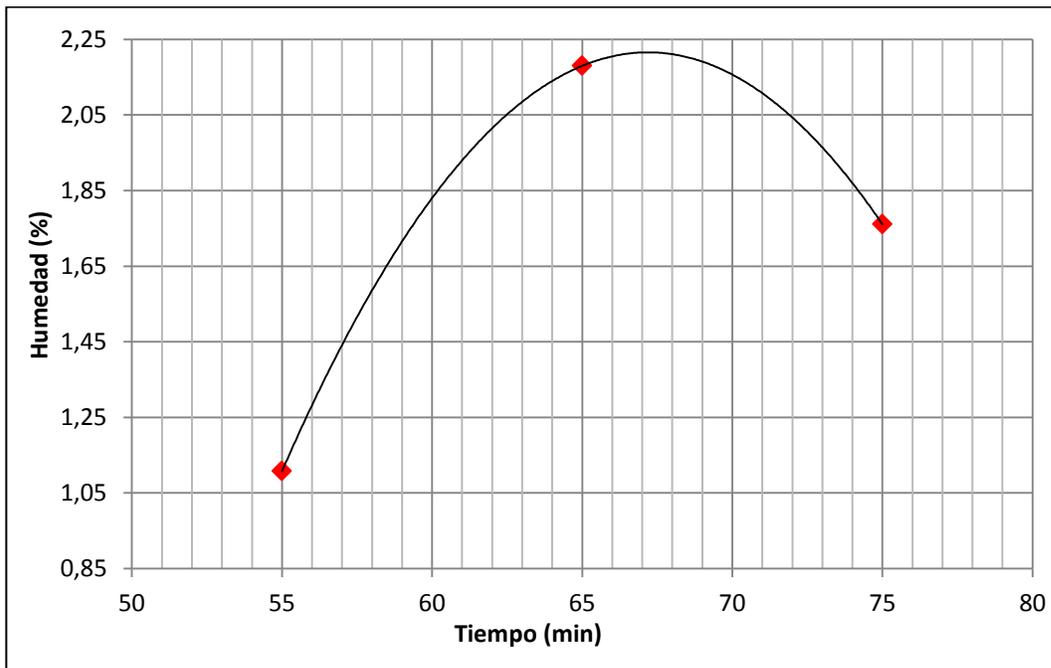


Ecuación	Coefficiente de correlación
$\%H = 0,0065t^2 - 0,7881t + 24,914$	1

(Ecuación 14)

Fuente: elaboración propia, sección datos calculados, tablas XXXVIII.

Figura 19. **Porcentaje de humedad en función del tiempo de residencia en el horno para probetas de madera plástica elaboradas con una formulación de 40 % de residuos de aserrín y 60 % de polietileno reciclado de baja densidad**

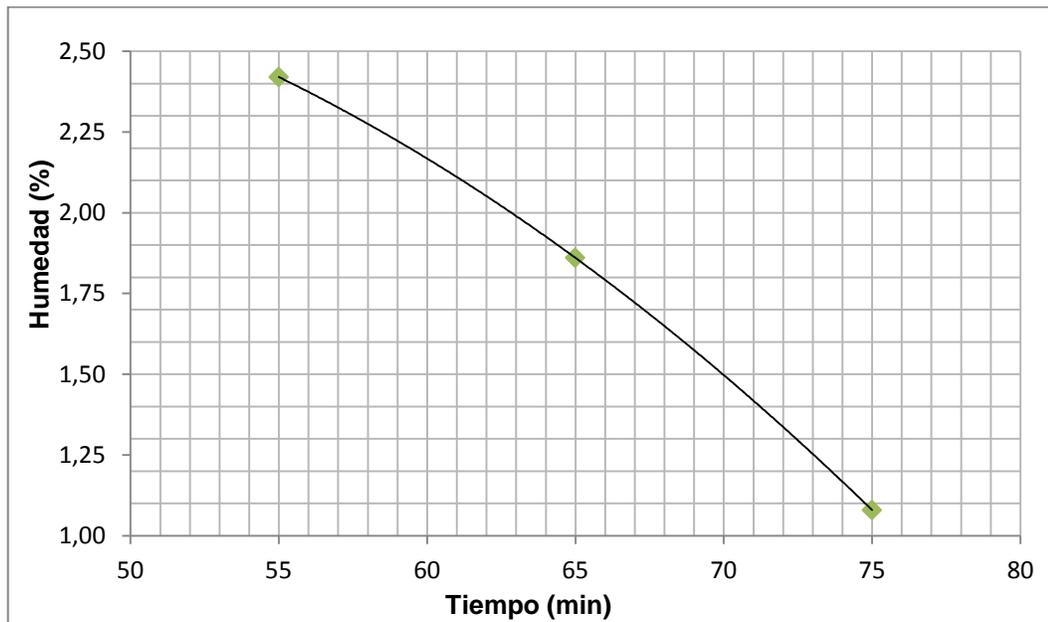


Ecuación	Coefficiente de correlación
$\%H = -0,0075t^2 + 1,0018t - 31,44$	1

(Ecuación 15)

Fuente: elaboración propia, sección datos calculados, tabla XXXIX.

Figura 20. **Porcentaje de humedad en función del tiempo de residencia en el horno para probetas de madera plástica, elaboradas con una formulación de 50 % de residuos de aserrín y 50 % de polietileno reciclado de baja densidad**



<b>Ecuación</b>	<b>Coefficiente de correlación</b>
$\%H = -0,0011t^2 + 0,0766t + 1,5496$	1

(Ecuación 16)

Fuente: elaboración propia, sección datos calculados, tabla XL.



## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Las probetas necesarias para llevar a cabo el presente trabajo de graduación, fueron fabricadas en la Sección de Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería. El material utilizado para la fabricación consistió en una serie de mezclas de desecho de aserrín y polietileno de baja densidad de reciclado primario. Se elaboraron 27 probetas de madera plástica, utilizando formulaciones de 30, 40 y 50 por ciento en peso de residuos de aserrín mezclado con polietileno de baja densidad. Cada probeta fue sometida a tratamiento térmico para plastificar el polímero en un horno de convección forzada. Se utilizaron tiempos de residencia en el horno de 55, 65 y 75 minutos, a una temperatura de 190 °C. Para la formación final de la probeta se usó una presión de compresión de 10 toneladas.

A las probetas obtenidas se les realizó una serie de pruebas fisicomecánicas tales como: densidad, fuerza de ruptura, temperatura de inflamación, dureza Janka y porcentaje de humedad, siguiendo las normas ASTM respectivas para cada prueba.

En las figuras 5, 6 y 7 se observa que la variación en la densidad de las probetas no siguió una tendencia predecible. En la figura 5, cuando se utiliza una formulación con 30 % de aserrín, se observa que la densidad incrementa al aumentar el tiempo de residencia en el horno y luego disminuye. Esto indica que el volumen de la probeta aumenta, debido a la contracción volumétrica provocada por la fusión del polímero a medida que el material compuesto permanece dentro del horno por arriba de los 62,5 minutos. Al analizar la figura 6, para una formulación de 40 % de aserrín y la figura 7, para una formulación

de 50 % de aserrín, se observa un comportamiento inverso al de la primera formulación. Para las últimas dos formulaciones, las cuales van añadiendo más aserrín a la mezcla, la densidad aumenta con el tiempo de residencia en el horno. Puesto que la masa es constante, solo el volumen final de la probeta influye sobre los valores de la densidad. Lo anterior es posible debido al reacomodo de las partículas de aserrín en los espacios vacíos a medida que el polímero se funde.

Al comparar las tres figuras se puede determinar que hay un punto de inflexión en la densidad de las probetas, cuando se alcanza un tiempo de horneado de alrededor de los 63 minutos de residencia. Todas las observaciones anteriores evidencian un síntoma de segregación de sólidos ya que la densidad se comportó de forma no predecible al aumentar la cantidad de aserrín en la mezcla, dicha segregación ocasionó heterogeneidad en las probetas resultantes al hacerse el polímero más fluido y al ser sometido a presiones altas.

Al analizar figuras 8, 9 y 10 se puede observar que la formulación 30/70 obtuvo mejores resultados en la prueba de ruptura, dicha propiedad aumentó proporcionalmente con el tiempo de residencia en el horno, para un tiempo de 55 minutos, la fuerza que la probeta soportó fue de 461 Newton, a los 65 minutos fue de 549 Newton, y a los 75 minutos de horneado fue de 575 Newton. La formulación 50 % de aserrín y 50 % de polímero obtuvo la menor resistencia a la ruptura con un valor de 248 Newton. La resistencia a la ruptura disminuyó a medida que se incorporaba más aserrín a la formulación evidenciando un debilitamiento en la resistencia del material debido a la mayor dispersión del polímero y a la formación de núcleos de aserrín.

Las figuras 11, 12 y 13 muestran los resultados de la prueba de inflamación. La formulación 30 % aserrín 70 % polímero a 55 minutos y la formulación 50 % aserrín y 50 % polímero a 75 minutos, obtuvieron el mismo valor de temperatura de inflamación, ambas probetas son inflamables a los 303 °C, siendo este el mayor valor obtenido en comparación con las otras probetas. La formulación de 40 % aserrín y 60 % polímero es inflamable a los 298 °C en sus tres tiempos de residencia en el horno que son 55, 65 y 75 minutos.

En la prueba de dureza Janka cuyos resultados se muestran en las figuras 14, 15 y 16 se observa que la formulación 50 % aserrín y 50 % polímero no pasó la prueba en ninguno de los tres tiempos de residencia en el horno, al igual que la formulación 30 % aserrín y 70 % polímero a un tiempo de 75 minutos de residencia en el horno. La formulación 40 % aserrín y 60 % polímero a 75 minutos de retención en el horno obtuvo el mayor grado Janka con un valor de 1 012 Grado Janka. Cabe mencionar que las formulaciones que no pasaron la prueba mostraron destrucción de la probeta antes de alcanzar el 50 % de penetración en el material, tal y como lo exige la norma.

En la figura 17, 18 y 19 se observa el comportamiento de la humedad en función del tiempo de residencia en el horno para las probetas fabricadas. Dicho parámetro tuvo una variación significativa y no produjo un patrón de comportamiento que fuera fácil de describir, ya que mientras que para la formulación 30 % aserrín y 70 % polímero la humedad disminuye y luego aumenta, para la formulación 40 % aserrín y 60 % polímero se comporta de forma contraria aumenta y luego disminuye, estas discrepancias en el comportamientos se deben a la heterogeneidad que presenta el material, debido a la posible segregación de polímero y aserrín cuando se somete al proceso de prensado.

A partir del análisis de varianza realizado se determinó que no hay influencia significativa tanto de las formulaciones, como de los tiempos de horneado utilizados sobre los valores de la densidad, no hay influencia del tiempo de horneado sobre el valor de la fuerza de ruptura pero sí hay influencia de la formulación. De las formulaciones analizadas, fue la formulación de 30 % aserrín 70 % polímero la que presentó mayor resistencia a la ruptura, lo cual indica que entre más plástico tenga más resistente será el material. En cuanto a la temperatura de inflamación se encontró que no hay influencia del tiempo de horneado y las formulaciones sobre los valores de la misma.

No se pudo aplicar el análisis de varianza a los resultados de la prueba de dureza Janka debido a que las probetas con tiempo de horneado de 55 minutos y de 75 minutos fallaron mecánicamente antes de alcanzar el 50 % de penetración que exige la Norma ASTM D143-09 para que sea considerada Grado Janka. Las probetas con formulación 40 % de aserrín y 60 % de polímero fueron las únicas que pasaron la prueba con valores de 753 kN a un tiempo de 55 minutos, 834 kN a un tiempo de 65 minutos y 1 012 kN a un tiempo de 75 minutos de residencia en el horno.

## CONCLUSIONES

1. Por arriba de los 55 minutos el tiempo de residencia en el horno no influye sobre las propiedades fisicomecánicas de la madera plástica.
2. La formulación no influye sobre el tiempo de residencia en el horno.
3. La formulación tiene un efecto significativo sobre la resistencia a la ruptura.
4. La formulación tiene un efecto significativo sobre la dureza Janka.
5. La temperatura de plastificación en el proceso de horneado es de 190 °C.



## RECOMENDACIONES

1. Realizar un estudio sobre la segregación de sólidos en las mezclas polietileno de baja densidad y aserrín, al ser sometidos a prensado a diferentes presiones y temperaturas.
2. Realizar un estudio de cortes histológicos para determinar la heterogeneidad de las mezclas de aserrín y polietileno de baja densidad.
3. Evaluar el potencial de aplicación de la madera plástica en la fabricación de elementos estructurales para la industria de construcción.
4. Realizar estudios similares para incluir mezclas de otros polímeros, que le proporcionen a la madera plástica más poder de penetración.



## BIBLIOGRAFÍA

1. HARPER, Charles A. *Manual de plásticos*. Tom. 1. México: McGraw-Hill Interamericana, 2004. 1052 p.
2. KIRK, E. Raymond; OTHMER, Donald F. *Enciclopedia de tecnología química*. Tom. 13. México: Unión Tipografía Hispanoamericana, 1963. 973 p.
3. McCABE WARREN, Julian C.; SMITH, Peter H. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. 7a ed. México: McGraw-Hill, 2007. 1211 p.
4. PÉREZ MÉNDEZ, Emerson Víctor Manuel. *Análisis de las propiedades físico mecánicas para un sustituto de madera natural elaborado a base de plásticos reciclados*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2010. 95 p.
5. RIVIERA TELLO, Mauricio Valentino. *Determinación de los parámetros adecuados para la elaboración de madera plástica por compresión en caliente de mezclas de desechos de madera teca (*Tectona Grandis*) reducidos a aserrín y polipropileno*. Trabajo de graduación de Ing. Químico. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2014. 112 p.

6. RODWELL M., Roger. *Handbook of wood chemistry and wood composites*. Estados Unidos: Taylor and Franceis, 2005. 474 p.
7. SAMPIERI, Roberto; FERNÁNDEZ COLLADO, Carlos; BAPTISTA LUCIO, María el Pilar. *Metodología de la investigación*. 4a ed. México: McGraw-Hill Interamericana, 2006. 139 p.
8. SOLDER BURILLO, Manuel. *Mil maderas II*. España: Universidad Politécnica de Valencia, 2004. 578 p.
9. WALPOLE, Ronald E.; MEYERS, Raymond H.; MEYERS, Sharon L. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. 6a ed. México: Prentice-Hall Hispanoamericana, 1999. 739 p.

## APÉNDICE

### DATOS CALCULADOS

Tabla I. **Nomenclatura utilizada para identificar las probetas realizadas**

NOMBENCLATURA IDENTIFICACIÓN DE PROBETAS				
Nomenclatura formulación	Formulación	Nomenclatura tiempo	Tiempo residencia en el horno (min)	Replicas
1	(30 % aserrín /70 % polietileno)	1	55	1
2	(40 % aserrín /60 % polietileno)	2	65	2
3	(50 % aserrín /50 % polietileno)	3	75	3

Fuente: elaboración propia.

**Ejemplo:** 123, identifica a la probeta con formulación uno, 30 % de aserrín y 70 % de polietileno de baja densidad de reciclado primario, tiempo de residencia en el horno dos, que es de 65 minutos y réplica 3.

Tabla II. **Datos obtenidos para determinar la densidad de las probetas con formulación 30 % de aserrín y 70 % de polietileno de baja densidad**

Tiempo de residencia en el horno (min)	Número identificación probeta	Ancho (cm)	Longitud (cm)	Espesor (cm)	volumen (cm <sup>3</sup> )	Masa (g)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
55	111	3,341	9,672	1,098	35,481	31,470	0,887	887
	112	3,647	9,659	1,105	38,937	33,650	0,864	864
	113	3,500	9,701	1,078	36,610	33,880	0,925	925
65	121	3,657	9,521	1,018	35,457	34,530	0,974	974
	122	3,594	9,858	0,914	32,395	31,240	0,964	964
	123	3,590	9,714	0,906	31,607	31,960	1,011	1011
75	131	3,687	9,664	1,104	39,349	32,390	0,823	823
	132	5,661	9,665	1,053	57,592	35,930	0,624	624
	133	3,638	9,573	1,046	36,416	34,200	0,939	939

Fuente: datos originales.

Tabla III. **Datos obtenidos para determinar la densidad de las probetas con formulación 40 % de aserrín y 60 % de polietileno de baja densidad**

Tiempo de residencia en el horno (min)	Número identificación probeta	Ancho (cm)	Longitud (cm)	Espesor (cm)	volumen (cm <sup>3</sup> )	Masa (g)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )
55	211	3,543	9,760	1,132	39,141	33,590	0,858	858
	212	3,601	9,611	0,988	34,209	32,810	0,959	959
	213	3,638	9,664	1,077	37,857	34,600	0,914	914
65	221	3,672	9,827	1,050	37,880	35,760	0,944	944
	222	3,585	9,693	0,943	32,780	33,830	1,032	1 032
	223	3,597	9,793	0,927	32,663	20,306	0,622	622
75	331	3,564	9,840	0,959	33,647	33,500	0,996	996
	332	3,618	9,793	0,951	33,686	33,610	0,998	998
	333	3,591	9,934	1,022	36,458	34,060	0,934	934

Fuente: datos originales.

Tabla IV. **Datos obtenidos para determinar la densidad de las probetas con formulación 50 % de aserrín y 50 % de polietileno de baja densidad**

Tiempo de residencia en el horno (min)	Número identificación probeta	Ancho (cm)	Longitud (cm)	Espesor (cm)	volumen (cm <sup>3</sup> )	Masa (g)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )
55	311	3,522	9,810	1,076	37,173	33,150	0,892	892
	312	3,488	9,733	1,145	38,856	32,270	0,830	830
	313	3,678	9,614	1,324	46,825	38,500	0,822	822
65	321	3,524	9,780	1,026	35,353	31,820	0,900	900
	322	3,691	9,759	1,042	37,533	34,280	0,913	913
	323	3,564	9,888	1,079	38,037	32,260	0,848	848
75	331	3,564	9,840	0,959	33,647	33,500	0,996	996
	332	3,618	9,793	0,951	33,686	33,610	0,998	998
	333	3,591	9,934	1,022	36,458	34,060	0,934	934

Fuente: datos originales.

Tabla V. **Fuerza aplicada a las probetas con formulación 30 % de aserrín 70 % de polietileno reciclado de baja densidad, en la determinación de la fuerza de ruptura**

Tiempo de residencia en el horno (min)	Número identificación probeta	Fuerza (kg)	Newton (N)
55	111	53	519,93
	112	42	412,02
	113	46	451,26
65	121	62	608,22
	122	44	431,64
	123	62	608,22
75	131	46	451,26
	132	62	608,22
	133	68	667,08

Fuente: datos originales.

Tabla VI. **Fuerza aplicada a las probetas con formulación 40 % de aserrín 60 % de polietileno reciclado de baja densidad, en la determinación de la fuerza de ruptura**

Tiempo de residencia en el horno (min)	Número identificación probeta	Fuerza (Kg)	Newton (N)
55	211	26	255,06
	212	32	313,92
	213	30	294,30
65	221	40	392,40
	222	46	451,26
	223	52	510,12
75	232	34	333,54
	233	32	313,92

Fuente: datos originales.

Tabla VII. **Fuerza aplicada a las probetas con formulación 50 % de aserrín 50 % de polietileno reciclado de baja densidad, en la determinación de la fuerza de ruptura**

Tiempo de residencia en el horno (min)	Número identificación probeta	Fuerza (Kg)	Newton (N)
55	311	24	235,44
	312	24	235,44
	313	16	156,96
65	321	24	235,44
	322	26	255,06
	323	26	255,06
75	331	32	313,92
	332	24	235,44
	333	20	196,20

Fuente: datos originales.

Tabla VIII. **Temperatura de inflamación para las probetas con formulación 30 % de aserrín 70 % de polietileno reciclado de baja densidad**

Tiempo de residencia en el horno (min)	Número identificación probeta	Temperatura probeta (°C)
55	111	310
	112	296
	113	303
65	121	290
	122	297
	123	295
75	131	295
	132	310
	133	303

Fuente: datos originales.

Tabla IX. **Temperatura de inflamación para las probetas con formulación 40 % de aserrín 60 % de polietileno reciclado de baja densidad**

Tiempo de residencia en el horno (min)	Número identificación probeta	Temperatura probeta (°C)
55	211	284
	212	293
	213	290
65	221	297
	222	300
	223	298
75	231	304
	232	293
	233	300

Fuente: datos originales.

Tabla X. **Temperatura de inflamación para las probetas con formulación 50 % de aserrín 50 % de polietileno reciclado de baja densidad**

<b>Tiempo de residencia en el horno (min)</b>	<b>Número identificación probeta</b>	<b>Temperatura probeta (°C)</b>
55	311	285
	312	304
	313	290
65	321	287
	322	287
	323	287
75	331	297
	332	309
	333	304

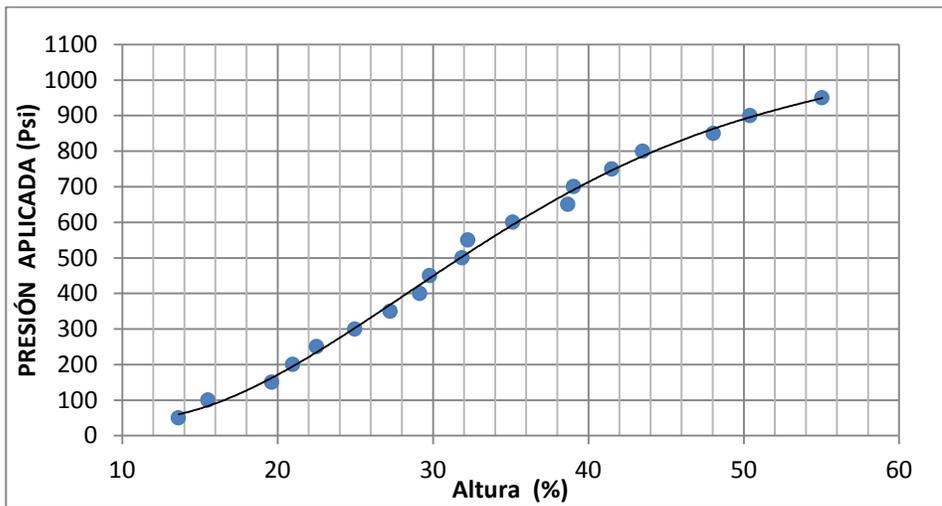
Fuente: datos originales.

Tabla XI. **Porcentaje de penetración para la determinación de la dureza Janka de las probetas con formulación 30 % de aserrín 70 % de polietileno reciclado de baja densidad a un tiempo de 55 minutos de horneado, réplica 1**

Tiempo de residencia en el horno (min)	Número identificación probeta	Presión (Psi)	Fuerza (N)	Penetración (%)
55	111	50	0,066	13,624
		100	0,131	15,531
		150	0,197	19,619
		200	0,262	20,981
		250	0,328	22,525
		300	0,393	24,977
		350	0,459	27,248
		400	0,524	29,155
		450	0,590	29,791
		500	0,655	31,880
		550	0,721	32,243
		600	0,786	35,150
		650	0,852	38,692
		700	0,917	39,055
		750	0,983	41,508
		800	1,048	43,506
		850	1,114	48,047
900	1,179	50,409		
950	1,245	55,041		
1000	1,311	74,932		

Fuente: datos originales.

Figura 1. Fuerza aplicada en función del porcentaje de penetración de las probetas 30 % aserrín y 70 % de polietileno de baja densidad, para la determinación del grado Janka, a un tiempo de 55 minutos de residencia en el horno, réplica 1



Fuente: datos calculados, tabla XI.

ECUACIÓN	Coefficiente de Correlación	Altura (%)	Dureza Janka (kN)
$F = 0,0004\%A^4 - 0,0669\%A^3 + 3,8068\%A^2 - 60,873\%A + 338,67$	0,99	50	1,244

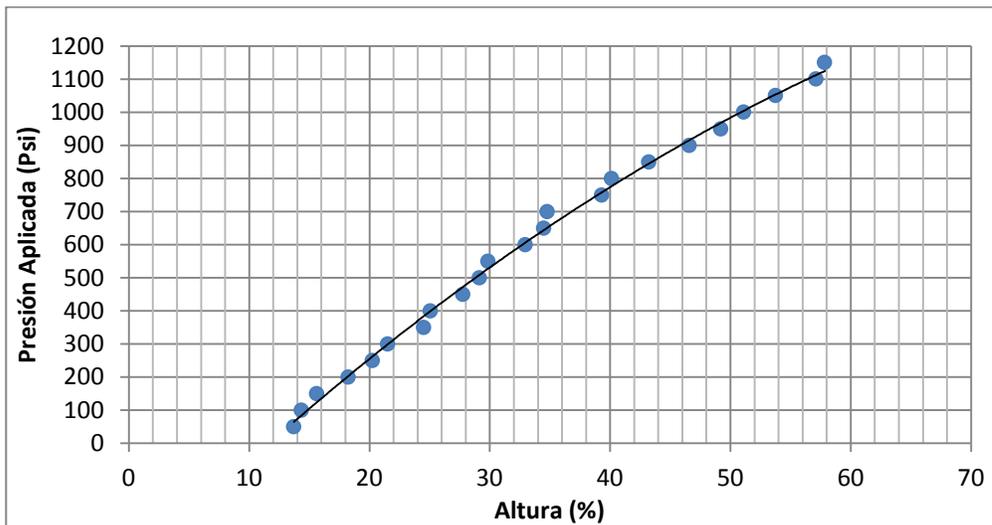
(Ecuación 1)

Tabla XII. **Porcentaje de penetración para la determinación de la dureza Janka de las probetas con formulación 30 % de aserrín 70 % de polietileno reciclado de baja densidad a un tiempo de 55 minutos de horneado, réplica 2**

Tiempo de residencia en el horno (min)	Número identificación probeta	Presión (Psi)	Fuerza (N)	Penetración (%)
55	112	50	0,066	13,715
		100	0,131	14,351
		150	0,197	15,622
		200	0,262	18,256
		250	0,328	20,254
		300	0,393	21,526
		350	0,459	24,523
		400	0,524	25,068
		450	0,590	27,793
		500	0,655	29,155
		550	0,721	29,882
		600	0,786	32,970
		650	0,852	34,514
		700	0,917	34,787
		750	0,983	39,328
		800	1,048	40,145
		850	1,114	43,233
		900	1,179	46,594
950	1,245	49,228		
1000	1,311	51,135		
1050	1,376	53,769		
1100	1,442	57,130		
1150	1,507	57,856		

Fuente: datos originales.

Figura 2. Fuerza aplicada en función del porcentaje de penetración de las probetas 30 % aserrín y 70 % de polietileno de baja densidad, para la determinación del grado Janka, a un tiempo de 55 minutos de residencia en el horno, réplica 2



Fuente: datos calculados, tabla XII.

ECUACIÓN	Coefficiente de Correlación	Altura (%)	Dureza Janka (kN)
$F = -0,1659A^2 + 35,889A - 396,14$	0,99	50	1,289

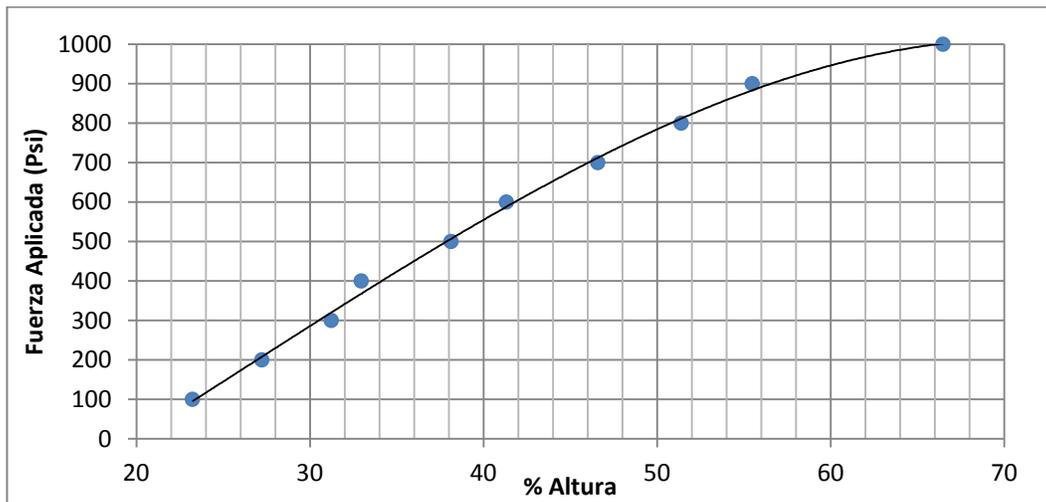
(Ecuación 2)

Tabla XIII. **Porcentaje de penetración para la determinación de la dureza Janka de las probetas con formulación 30 % de aserrín 70 % de polietileno reciclado de baja densidad a un tiempo de 55 minutos de horneado, réplica 3**

Tiempo de residencia en el horno (min)	Número identificación probeta	Presión (Psi)	Fuerza (N)	Penetración (%)
55	113	100	0,131	23,252
		200	0,262	27,248
		300	0,393	31,244
		400	0,524	32,970
		500	0,655	38,147
		600	0,786	41,326
		700	0,917	46,594
		800	1,048	51,408
		900	1,179	55,495
		1000	1,311	66,485

Fuente: datos originales.

Figura 3. Fuerza aplicada en función del porcentaje de penetración de las probetas 30 % aserrín y 70 % de polietileno de baja densidad, para la determinación del grado Janka, a un tiempo de 55 minutos de residencia en el horno, réplica 3



Fuente: datos calculados, tabla XIII.

ECUACIÓN	Coefficiente de Correlación	Altura (%)	Dureza Janka (kN)
$F = -0,0047\%A^3 + 0,3599\%A^2 + 18,948\%A - 480,76$	0,99	50	1,289

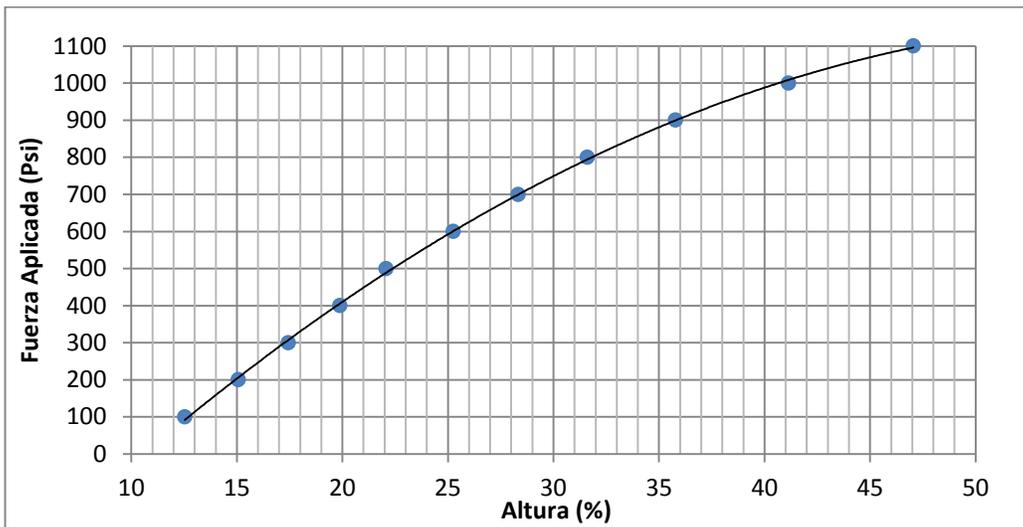
(Ecuación 3)

Tabla XIV. **Porcentaje de penetración para la determinación de la dureza Janka de las probetas con formulación 30 % de aserrín 70 % de polietileno reciclado de baja densidad a un tiempo de 65 minutos de horneado, réplica 1**

Tiempo de residencia en el horno (min)	Número identificación probeta	Presión (Psi)	Fuerza (N)	Penetración (%)
65	221	100	0,131	12,534
		200	0,262	15,077
		300	0,393	17,439
		400	0,524	19,891
		500	0,655	22,071
		600	0,786	25,250
		700	0,917	28,338
		800	1,048	31,608
		900	1,179	35,786
		1000	1,311	41,144
		1100	1,442	47,048

Fuente: datos originales.

Figura 4. Fuerza aplicada en función del porcentaje de penetración de las probetas 30 % aserrín y 70 % de polietileno de baja densidad, para la determinación del grado Janka, a un tiempo de 65 minutos de residencia en el horno, réplica 1



Fuente: datos calculados, tabla XIV.

ECUACIÓN	Coefficiente de Correlación	Altura (%)	Dureza Janka (kN)
$F = -0,501\%A^2 + 58,948\%A - 568,31$	0,99	50	1,476

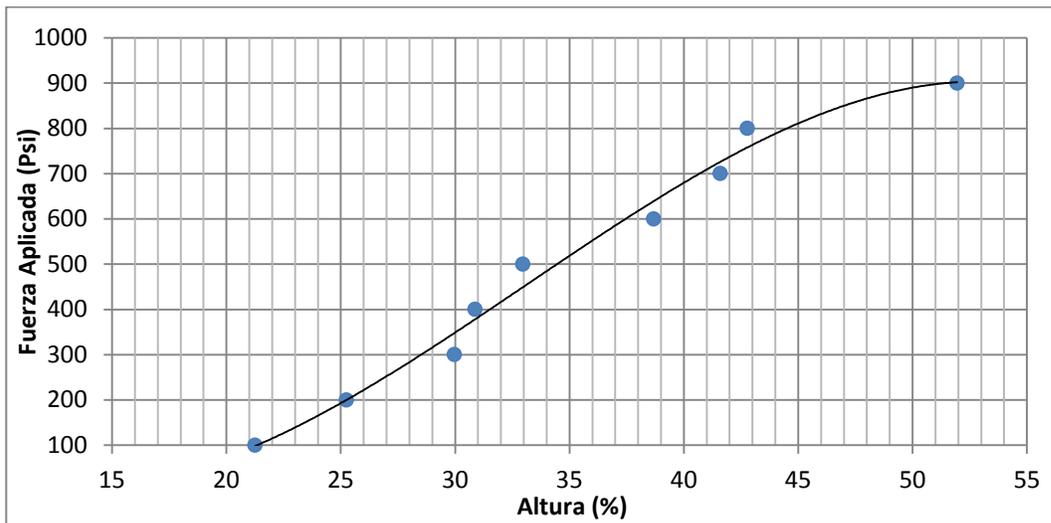
(Ecuación 4)

Tabla XV. **Porcentaje de penetración para la determinación de la dureza Janka de las probetas con formulación 30 % de aserrín 70 % de polietileno reciclado de baja densidad a un tiempo de 65 minutos de horneado, réplica 2**

Tiempo de residencia en el horno (min)	Número identificación probeta	Presión (Psi)	Fuerza (N)	Penetración (%)
65	222	100	0,131	21,253
		200	0,262	25,250
		300	0,393	29,973
		400	0,524	30,881
		500	0,655	32,970
		600	0,786	38,692
		700	0,917	41,599
		800	1,048	42,779
		900	1,179	51,953
		1000	1,311	72,934

Fuente: datos originales.

Figura 5. Fuerza aplicada en función del porcentaje de penetración de las probetas 30 % aserrín y 70 % de polietileno de baja densidad, para la determinación del grado Janka, a un tiempo de 65 minutos de residencia en el horno, replica 2



Fuente: datos calculados, tabla XV.

ECUACIÓN	Coefficiente de Correlación	Altura (%)	Dureza Janka (kN)
$F = -0,0292\%A^3 + 2,9006\%A^2 - 61,889\%A + 383,64$	<b>0,98</b>	<b>50</b>	<b>1,476</b>

(Ecuación 5)

Tabla XVI. **Porcentaje de penetración para la determinación de la dureza Janka de las probetas con formulación 30 % de aserrín 70 % de polietileno reciclado de baja densidad a un tiempo de 65 minutos de horneado, réplica 3**

Tiempo de residencia en el horno (min)	Número identificación probeta	Presión (Psi)	Fuerza (N)	Penetración (%)
65	223	100	0,131	23,978
		200	0,262	25,613
		300	0,393	31,335
		400	0,524	35,241
		500	0,655	40,690
		600	0,786	45,504

Fuente: datos originales.

Tabla XVII. **Porcentaje de penetración para la determinación de la dureza Janka de las probetas con formulación 30 % de aserrín 70 % de polietileno reciclado de baja densidad a un tiempo de 75 minutos de horneado, réplica 1**

Tiempo de residencia en el horno (min)	Número identificación probeta	Presión (Psi)	Fuerza (N)	Penetración (%)
75	331	100	0,131	14,169
		300	0,393	20,254
		500	0,655	26,612
		800	1,048	39,328

Fuente: datos originales.

Tabla XVIII. **Porcentaje de penetración para la determinación de la dureza Janka de las probetas con formulación 30 % de aserrín 70 % de polietileno reciclado de baja densidad a un tiempo de 75 minutos de horneado, réplica 2**

Tiempo de residencia en el horno (min)	Número identificación probeta	Presión (Psi)	Fuerza (N)	Penetración (%)
75	332	100	0,131	18,529
		300	0,393	24,160
		500	0,655	28,065
		800	1,048	38,510
		900	1,179	41,962

Fuente: datos originales.

Tabla XIX. **Porcentaje de penetración para la determinación de la dureza Janka de las probetas con formulación 30 % de aserrín 70 % de polietileno reciclado de baja densidad a un tiempo de 75 minutos de horneado, réplica 3**

Tiempo de residencia en el horno (min)	Número identificación probeta	Presión (Psi)	Fuerza (N)	Penetración (%)
75	333	100	0,131	17,802
		300	0,393	25,795
		500	0,655	32,062
		600	0,786	37,693
		700	0,917	41,508
		800	1,048	41,508
		900	1,179	43,597

Fuente: datos originales.

Tabla XX. **Porcentaje de penetración para la determinación de la dureza Janka de las probetas con formulación 40 % de aserrín 60 % de polietileno reciclado de baja densidad a un tiempo de 55 minutos de horneado, réplica 1**

Tiempo de residencia en el horno (min)	Número identificación probeta	Presión (Psi)	Fuerza (N)	Penetración (%)
55	211	100	0.131	9.991
		300	0.393	19.437
		500	0.655	28.156
		600	0.786	31.789
		700	0.917	37.784
		800	1.048	41.326

Fuente: datos originales.

Tabla XXI. **Porcentaje de penetración para la determinación de la dureza Janka de las probetas con formulación 40 % de aserrín 60 % de polietileno reciclado de baja densidad a un tiempo de 55 minutos de horneado, réplica 2**

Tiempo de residencia en el horno (min)	Número identificación probeta	Presión (Psi)	Fuerza (N)	Penetración (%)
55	212	100	0,131	20,254
		300	0,393	20,345
		500	0,655	38,329
		600	0,786	46,412

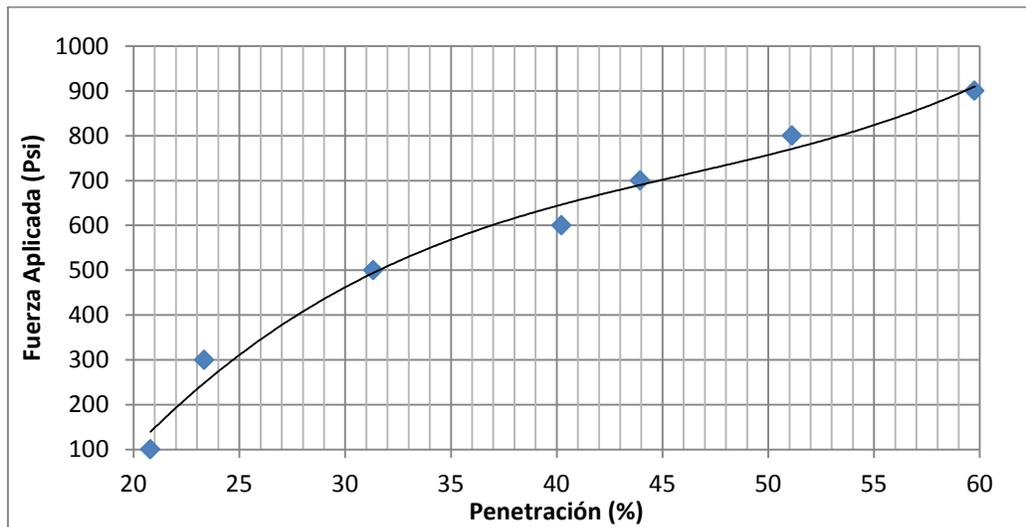
Fuente: datos originales.

Tabla XXII. **Porcentaje de penetración para la determinación de la dureza Janka de las probetas con formulación 40 % de aserrín 60 % de polietileno reciclado de baja densidad a un tiempo de 55 minutos de horneado, réplica 3**

Tiempo de residencia en el horno (min)	Número identificación probeta	Presión (Psi)	Fuerza (N)	Penetración (%)
55	213	100	0,131	20,799
		300	0,393	23,342
		500	0,655	31,335
		600	0,786	40,236
		700	0,917	43,960
		800	1,048	51,135
		900	1,179	59,764

Fuente: datos originales.

Figura 6. Fuerza aplicada en función del porcentaje de penetración de las probetas 40 % aserrín y 60 % de polietileno de baja densidad, para la determinación del grado Janka, a un tiempo de 55 minutos de residencia en el horno, réplica 3



Fuente: datos calculados, tabla XXII.

ECUACIÓN	Coefficiente de Correlación	Altura (%)	Dureza Janka (kN)
$F = 0,0186\%A^3 - 2,5702\%A^2 + 129,24\%A - 1604,2$	0,98	50	0,992

(Ecuación 6)

Tabla XXIII. **Porcentaje de penetración para la determinación de la dureza Janka de las probetas con formulación 40 % de aserrín 60 % de polietileno reciclado de baja densidad a un tiempo de 65 minutos de horneado, réplica 1**

Tiempo de residencia en el horno (min)	Número identificación probeta	Presión (Psi)	Fuerza (N)	Penetración (%)
65	221	100	0,131	23,070
		300	0,393	29,337
		500	0,655	32,970
		600	0,786	34,787
		700	0,917	40,418
		800	1,048	49,137

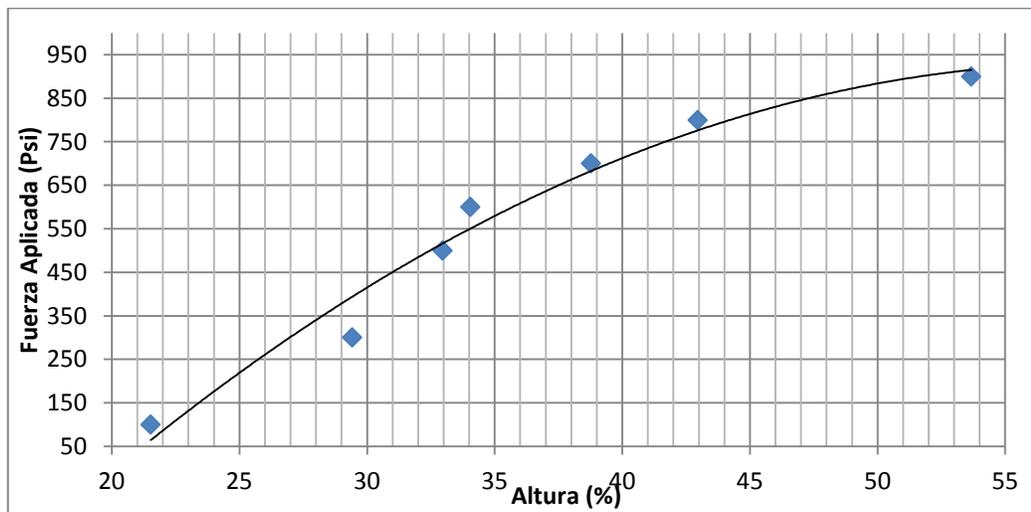
Fuente: datos originales.

Tabla XXIV. **Porcentaje de penetración para la determinación de la dureza Janka de las probetas con formulación 40 % de aserrín 60 % de polietileno reciclado de baja densidad a un tiempo de 65 minutos de horneado, réplica 2**

Tiempo de residencia en el horno (min)	Número identificación probeta	Presión (Psi)	Fuerza (N)	Penetración (%)
65	222	100	0,131	21,526
		300	0,393	29,428
		500	0,655	32,970
		600	0,786	34,060
		700	0,917	38,783
		800	1,048	42,961
		900	1,179	53,678

Fuente: datos originales.

Figura 7. Fuerza aplicada en función del porcentaje de penetración de las probetas 40 % aserrín y 60 % de polietileno de baja densidad, para la determinación del grado Janka, a un tiempo de 65 minutos de residencia en el horno, réplica 2



Fuente: datos calculados, tabla XXIV.

ECUACIÓN	Coefficiente de Correlación	Altura (%)	Dureza Janka (kN)
$F = -0,63\%A^2 + 73,845\%A - 1233,4$	0,97	50	1,158

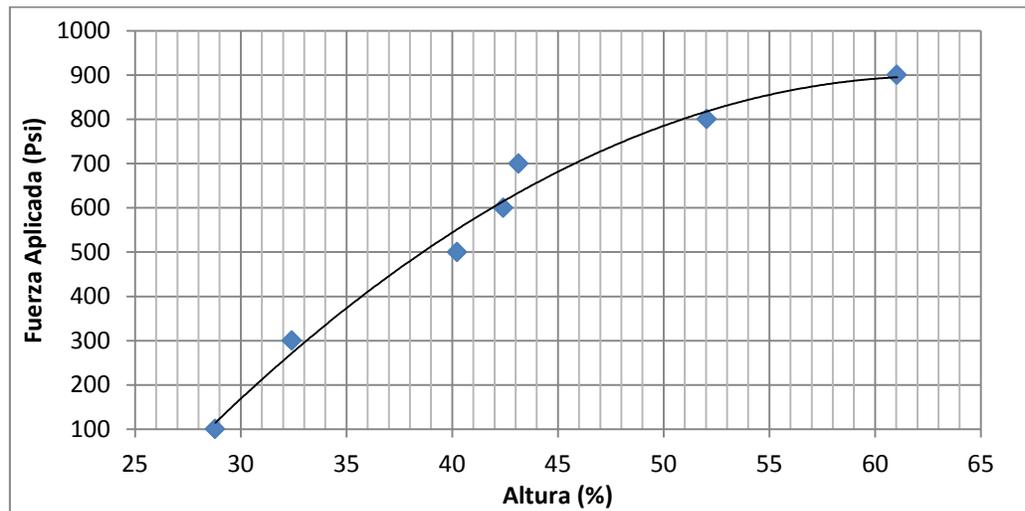
(Ecuación 7)

Tabla XXV. **Porcentaje de penetración para la determinación de la dureza Janka de las probetas con formulación 40 % de aserrín 60 % de polietileno reciclado de baja densidad a un tiempo de 65 minutos de horneado, réplica 3**

<b>Tiempo de residencia en el horno (min)</b>	<b>Número identificación probeta</b>	<b>Presión (Psi)</b>	<b>Fuerza (N)</b>	<b>Penetración (%)</b>
65	223	100	0,131	28,792
		300	0,393	32,425
		500	0,655	40,236
		600	0,786	42,416
		700	0,917	43,143
		800	1,048	52,044
		900	1,179	61,035

Fuente: datos originales.

Figura 8. Fuerza aplicada en función del porcentaje de penetración de las probetas 40 % aserrín y 60 % de polietileno de baja densidad, para la determinación del grado Janka, a un tiempo de 65 minutos de residencia en el horno, réplica 3



Fuente: datos calculados, tabla XXV.

ECUACIÓN	Coefficiente de Correlación	Altura (%)	Dureza Janka (kN)
$F = -0,6724\%A^2 + 84,612\%A - 1764,4$	0,98	50	1,029

(Ecuación 8)

Tabla XXVI. **Porcentaje de penetración para la determinación de la dureza Janka de las probetas con formulación 40 % de aserrín 60 % de polietileno reciclado de baja densidad a un tiempo de 75 minutos de horneado, réplica 1**

Tiempo de residencia en el horno (min)	Número identificación probeta	Presión (Psi)	Fuerza (N)	Penetración (%)
75	231	100	0,131	25,068
		300	0,393	34,787
		500	0,655	40,236
		600	0,786	41,871
		700	0,917	44,051
		800	1,048	48,320

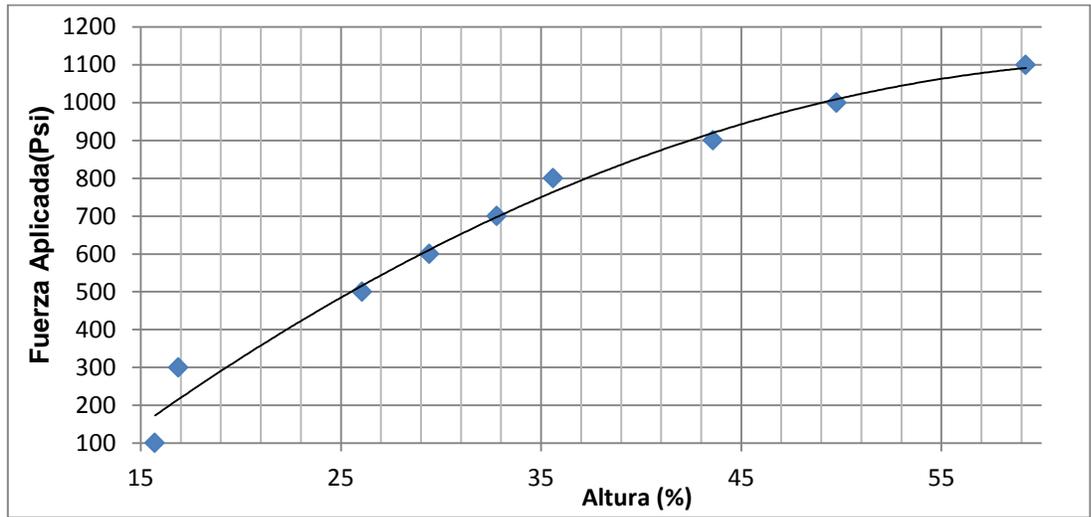
Fuente: datos originales.

Tabla XXVII. **Porcentaje de penetración para la determinación de la dureza Janka de las probetas con formulación 40 % de aserrín 60 % de polietileno reciclado de baja densidad a un tiempo de 75 minutos de horneado, réplica 2**

Tiempo de residencia en el horno (min)	Número identificación probeta	Presión (Psi)	Fuerza (N)	Penetración (%)
75	232	100	0,131	15,713
		300	0,393	16,894
		500	0,655	26,067
		600	0,786	29,428
		700	0,917	32,788
		800	1,048	35,604
		900	1,179	43,597
		1000	1,311	49,773
		1100	1,442	59,219

Fuente: datos originales.

Figura 9. Fuerza aplicada en función del porcentaje de penetración de las probetas 40 % aserrín y 60 % de polietileno de baja densidad, para la determinación del grado Janka, a un tiempo de 75 minutos de residencia en el horno, réplica 2



Fuente: datos calculados, tabla XXVII.

ECUACIÓN	Coefficiente de Correlación	Altura (%)	Dureza Janka (kN)
$F = -0,3638\%A^2 + 48,381\%A - 497,44$	<b>0,98</b>	<b>50</b>	<b>1,326</b>

(Ecuación 9)

Tabla XXVIII. **Porcentaje de penetración para la determinación de la dureza Janka de las probetas con formulación 40 % de aserrín 60 % de polietileno reciclado de baja densidad a un tiempo de 75 minutos de horneado, réplica 3**

Tiempo de residencia en el horno (min)	Número identificación probeta	Presión (Psi)	Fuerza (N)	Penetración (%)
75	233	100	0,131	20,890
		300	0,393	21,344
		500	0,655	25,613
		600	0,786	26,703
		700	0,917	31,789
		800	1,048	34,151

Fuente: datos originales.

Tabla XXIX. **Porcentaje de penetración para la determinación de la dureza Janka de las probetas con formulación 50 % de aserrín 50% de polietileno reciclado de baja densidad a un tiempo de 55 minutos de horneado, réplica 1**

Tiempo de residencia en el horno (min)	Número identificación probeta	Presión (Psi)	Fuerza (N)	Penetración (%)
55	311	100	0,131	21,889
		300	0,393	28,701
		500	0,655	35,604
		600	0,786	42,688

Fuente: datos originales.

Tabla XXX. **Porcentaje de penetración para la determinación de la dureza Janka de las probetas con formulación 50 % de aserrín 50 % de polietileno reciclado de baja densidad un tiempo de 55 minutos de horneado, réplica 2**

Tiempo de residencia en el horno (min)	Número identificación probeta	Presión (Psi)	Fuerza (N)	Penetración (%)
55	312	100	0,131	17,984
		300	0,393	23,797
		500	0,655	29,973
		600	0,786	32,970
		700	0,917	35,241
		800	1,048	40,236

Fuente: datos originales.

Tabla XXXI. **Porcentaje de penetración para la determinación de la dureza Janka de las probetas con formulación 50 % de aserrín 50 % de polietileno reciclado de baja densidad a un tiempo de 55 minutos de horneado, réplica 3**

Tiempo de residencia en el horno (min)	Número identificación probeta	Presión (Psi)	Fuerza (N)	Penetración (%)
55	313	100	0,131	12,807
		300	0,393	18,256
		500	0,655	30,790
		600	0,786	35,967

Fuente: datos originales.

Tabla XXXII. **Porcentaje de penetración para la determinación de la dureza Janka de las probetas con formulación 50 % de aserrín 50 % de polietileno reciclado de baja densidad a un tiempo de 65 minutos de horneado, réplica 1**

Tiempo de residencia en el horno (min)	Número identificación probeta	Presión (Psi)	Fuerza (N)	Penetración (%)
65	321	100	0,131	22,616
		300	0,393	31,426
		500	0,655	36,603
		600	0,786	37,421
		700	0,917	40,418
		800	1,048	43,143
		900	1,179	48,229

Fuente: datos originales.

Tabla XXXIII. **Porcentaje de penetración para la determinación de la dureza Janka de las probetas con formulación 50 % de aserrín 50 % de polietileno reciclado de baja densidad a un tiempo de 65 minutos de horneado, réplica 2**

Tiempo de residencia en el horno (min)	Número identificación probeta	Presión (Psi)	Fuerza (N)	Penetración (%)
65	322	100	0,131	18,256
		300	0,393	24,160
		500	0,655	29,973
		600	0,786	30,699
		700	0,917	34,060
		800	1,048	36,694
		900	1,179	41,780
		1000	1,311	48,320

Fuente: datos originales.

Tabla XXXIV. **Porcentaje de penetración para la determinación de la dureza Janka de las probetas con formulación 50 % de aserrín 50 % de polietileno reciclado de baja densidad a un tiempo de 65 minutos de horneado, réplica 3**

Tiempo de residencia en el horno (min)	Número identificación probeta	Presión (Psi)	Fuerza (N)	Penetración (%)
65	323	100	0,131	16,894
		300	0,393	24,432
		500	0,655	32,788
		600	0,786	32,698
		700	0,917	32,879
		800	1,048	36,058
		900	1,179	40,145

Fuente: datos originales.

Tabla XXXV. **Porcentaje de penetración para la determinación de la dureza Janka de las probetas con formulación 50 % de aserrín 50 % de polietileno reciclado de baja densidad a un tiempo de 75 minutos de horneado, réplica 1**

Tiempo de residencia en el horno (min)	Número identificación probeta	Presión (Psi)	Fuerza (N)	Penetración (%)
75	331	100	0,131	15,895
		300	0,393	24,069
		500	0,655	28,701
		600	0,786	33,787
		700	0,917	34,787
		800	1,048	38,601
		900	1,179	41,780

Fuente: datos originales.

Tabla XXXVI. **Porcentaje de penetración para la determinación de la dureza Janka de las probetas con formulación 50 % de aserrín 50 % de polietileno reciclado de baja densidad a un tiempo de 75 minutos de horneado, réplica 2**

Tiempo de residencia en el horno (min)	Número identificación probeta	Presión (Psi)	Fuerza (N)	Penetración (%)
75	332	100	0,131	12,080
		300	0,393	20,708
		400	0,524	22,797
		500	0,655	23,524
		600	0,786	28,520
		700	0,917	32,334
		800	1,048	40,781
		900	1,179	43,960

Fuente: datos originales.

Tabla XXXVII. **Porcentaje de penetración para la determinación de la dureza Janka de las probetas con formulación 50 % de aserrín 50 % de polietileno reciclado de baja densidad a un tiempo de 75 minutos de horneado, réplica 3**

Tiempo de residencia en el horno (min)	Número identificación probeta	Presión (Psi)	Fuerza (N)	Penetración (%)
75	333	100	0,131	15,441
		300	0,393	20,981
		500	0,655	29,337
		600	0,786	30,336
		700	0,917	36,058
		800	1,048	43,052

Fuente: datos originales.

Tabla XXXVIII. **Datos obtenidos del porcentaje de humedad de las probetas con formulación 30 % de aserrín 70 % de polietileno reciclado de baja densidad**

<b>Tiempo de residencia en el horno (min)</b>	<b>Número identificación probeta</b>	<b>Contenido de humedad (%M)</b>
55	112	1,110
65	121	0,981
75	133	2,144

Fuente: datos originales.

Tabla XXXIX. **Datos obtenidos del porcentaje de humedad de las probetas con formulación 40 % de aserrín 60 % de polietileno reciclado de baja densidad**

<b>Tiempo de residencia en el horno (min)</b>	<b>Número identificación probeta</b>	<b>Contenido de humedad (%M)</b>
55	221	1,108
65	223	2,180
75	231	1,761

Fuente: datos originales.

Tabla XL. **Datos obtenidos del porcentaje de humedad de las probetas con formulación 50 % de aserrín 50 % de polietileno reciclado de baja densidad**

Tiempo de residencia en el horno (min)	Número identificación probeta	Contenido de humedad (%M)
55	312	2,42
65	322	1,86
75	332	1,079

Fuente: datos originales.

Tabla XLI. **Datos análisis de varianza para prueba de densidad**

Tiempo	Densidad ( $\sigma$ )			TOTAL
	Formulación (%)			
	30/70	40/60	50/50	
<b>40</b>	2 676,612	2 731,283	2 544,488	7 952,382
<b>50</b>	2 949,402	2 597,735	2 552,789	8 099,926
<b>60</b>	2 386,167	3 155,459	2 635,613	8 177,239
<b>TOTAL</b>	8 012,180	8 484,477	7 732,890	2 4229,547

Fuente: sección 3.8 análisis estadístico.

Tabla XLII. **Datos análisis de varianza para prueba de fuerza de ruptura**

Tiempo	Fuerza (N)			TOTAL
	Formulación (%)			
	30/70	40/60	50/50	
<b>40</b>	1 383,210	863,280	627,840	2 874,330
<b>50</b>	1 648,080	1 353,780	627,840	3 629,700
<b>60</b>	1 726,560	971,190	647,460	3,345,210
<b>TOTAL</b>	4 757,850	3 188,250	1 903,140	9 849,240

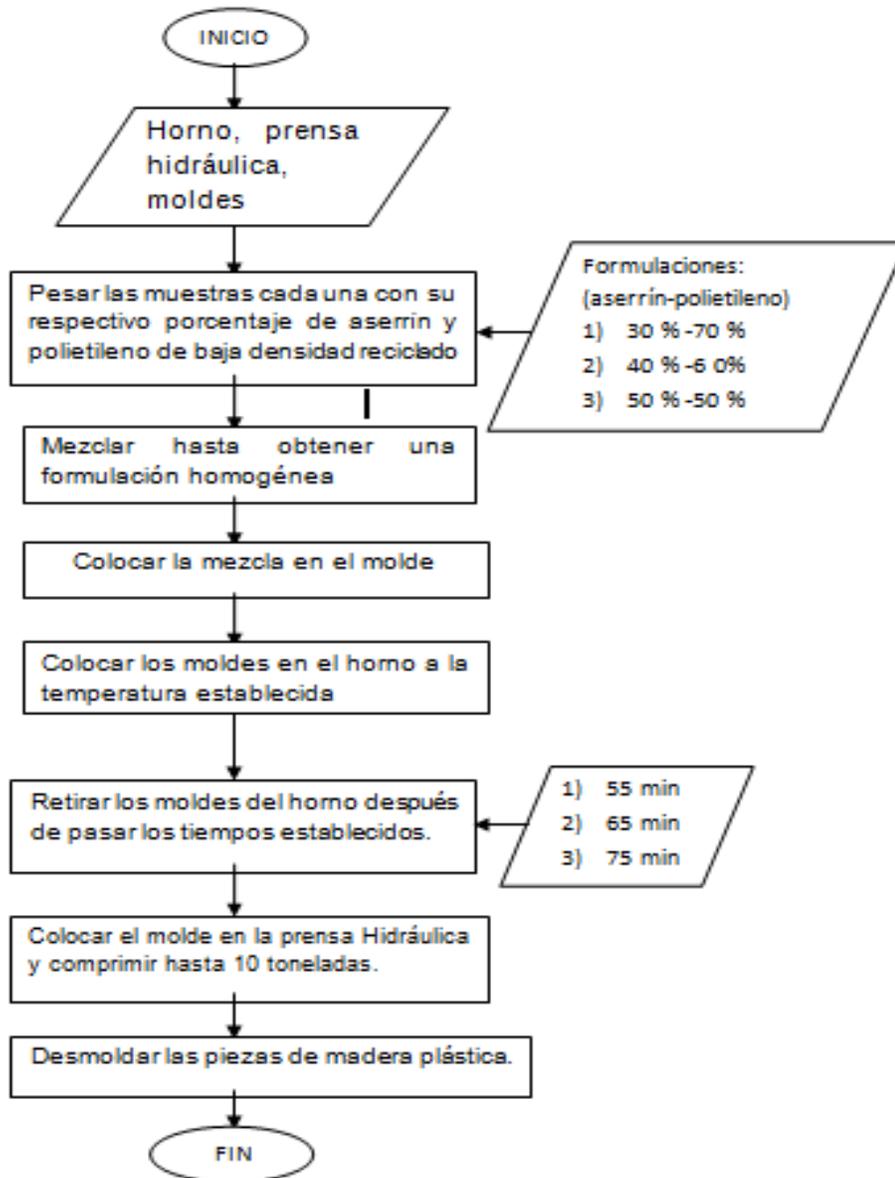
Fuente: sección 3.8 análisis estadístico.

Tabla XLIII. **Datos análisis de varianza para prueba de Temperatura de inflamación**

Tiempo	Temperatura Inflamación (°C)			TOTAL
	Formulación (%)			
	30/70	40/60	50/50	
<b>40</b>	909	867	879	2 655
<b>50</b>	882	895	881	2 658
<b>60</b>	908	897	864	2 669
<b>TOTAL</b>	2 699	2 659	2 624	7 982

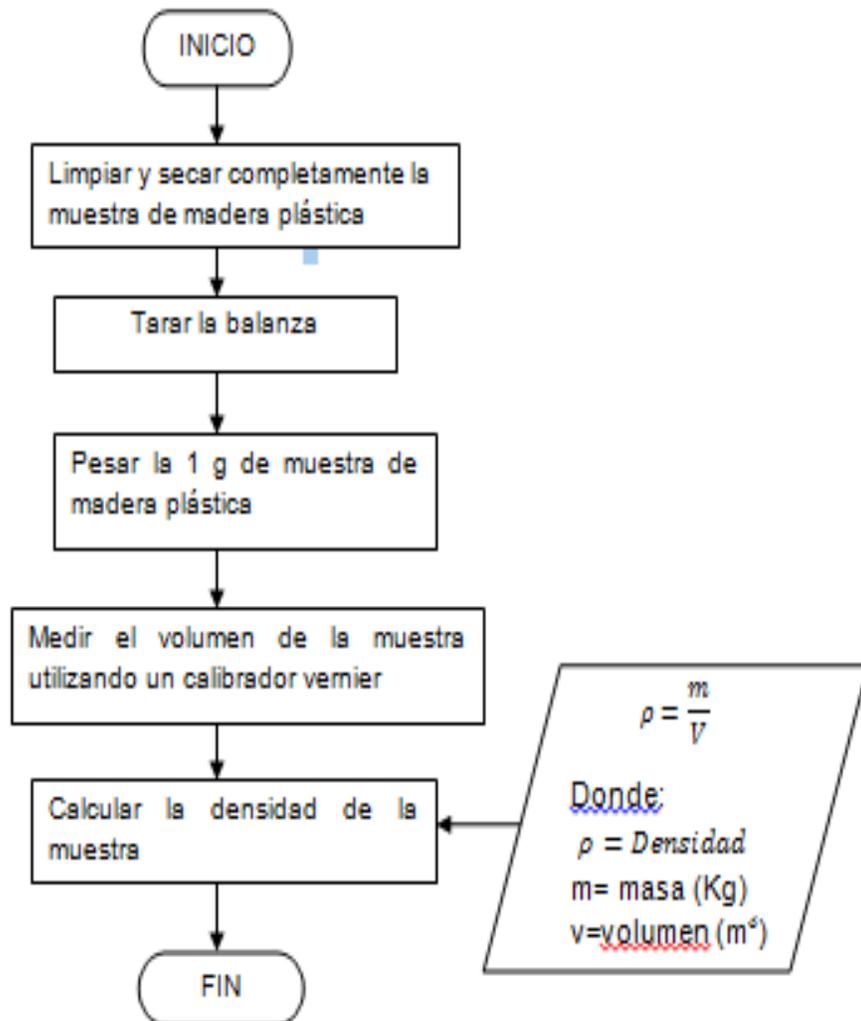
Fuente: sección 3.8 análisis estadístico.

Figura 10. **Elaboración de madera plástica**



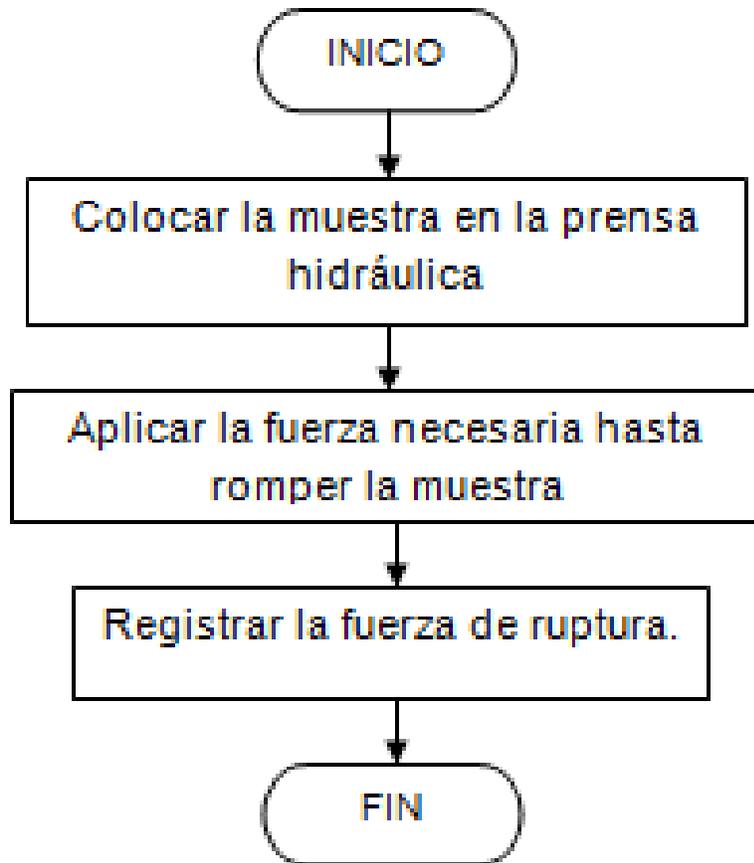
Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Determinación de la densidad**



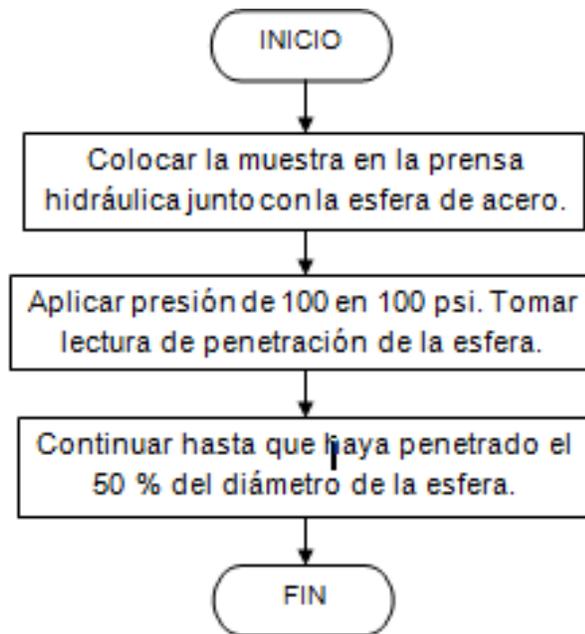
Fuente: elaboración propia.

Figura 13. **Determinación de la Fuerza de ruptura**



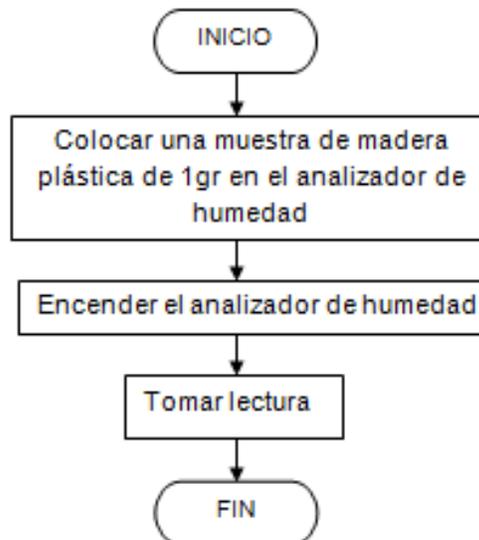
Fuente: elaboración propia.

Figura 14. **Determinación de la Dureza Janka**



Fuente: elaboración propia.

Figura 15. **Determinación de la humedad**



Fuente: elaboración propia.

Figura 16. **Recolección de materia prima**



Aserrín

Polietileno de baja densidad

Fuente: Laboratorio Tecnología de la Madera CII, USAC.

Figura 17. **Horneado de las probetas**



Fuente: Laboratorio Tecnología de la Madera CII, USAC.

Figura 18. **Pruebas preliminares**



Fuente: Laboratorio Tecnología de la Madera CII, USAC.

Figura 19. **Prueba de Dureza**



Fuente: Laboratorio Tecnología de la Madera CII, USAC.

Figura 20. Prueba de Ruptura



Fuente: Laboratorio Tecnología de la Madera CII, USAC.

Figura 21. Prueba de temperatura de inflamación



Fuente: Laboratorio Tecnología de la Madera CII, USAC.