



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

**EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOMECÁNICAS DE LA MADERA  
PLÁSTICA ELABORADA A PARTIR DE MEZCLAS DE RESIDUOS DE  
ASERRÍN Y POLIETILENTEREFTALATO RECICLADO (PET RECICLADO)**

**Aurora María Ortiz Villalta**

Asesorado por el Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus

Guatemala, septiembre de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOMECÁNICAS DE LA MADERA  
PLÁSTICA ELABORADA A PARTIR DE MEZCLAS DE RESIDUOS DE  
ASERRÍN Y POLIETILENTEREFTALATO RECICLADO (PET RECICLADO)**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**AURORA MARÍA ORTIZ VILLALTA**

ASESORADO POR EL ING. JORGE EMILIO GODÍNEZ LEMUS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERA QUÍMICA**

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl de León de Paz
EXAMINADORA	Inga. Adela María Marroquín González
EXAMINADORA	Inga. Casta Petrona Zeceña Zeceña
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 LAS PROPIEDADES FISICOMECÁNICAS DE LA MADERA  
PLÁSTICA ELABORADA A PARTIR DE MEZCLAS DE RESIDUOS DE  
ASERRÍN Y POLIETILENTEREFTALATO RECICLADO (PET RECICLADO)**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 26 de julio de 2013.



**Aurora Maria Ortiz Villalta**



Guatemala 06 de Julio del 2,015

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

Ingeniero Monzón:

Por este medio informo a usted que he revisado el informe final del trabajo de graduación "EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOMECAÑICAS DE LA MADERA PLÁSTICA ELABORADA A PARTIR DE MEZCLAS DE RESIDUOS DE ASERRÍN Y POLIETILENTEREFTALATO RECICLADO (PET RECICLADO)" elaborado por la estudiante Aurora María Ortiz Villalta, quien se identifica con el carne No. 200819172, el cual he encontrado *satisfactorio*.

Atentamente.



Ing. Jorge Emilio Godínez  
Asesor del Trabajo de Graduación

Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus  
INGENIERO QUÍMICO  
Colegiado 874



Guatemala, 10 de agosto de 2015.  
Ref. EIQ.TG-IF.048.2015.

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 **098-2013** 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: **Aurora María Ortiz Villalta**.  
Identificada con número de carné: **2008-19172**.  
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 LAS PROPIEDADES FISICOMECAÑICAS DE LA MADERA PLÁSTICA ELABORADA A PARTIR DE MEZCLAS DE RESIDUOS DE ASERRÍN Y POLIETILENTEREFTALATO RECICLADO (PET RECICLADO)**

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 Roquel Chávez  
COORDINADORA DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





Ref.EIQ.TG.125.2015

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, **AURORA MARÍA ORTÍZ VILLALTA** titulado: "**EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOMECAÑICAS DE LA MADERA PLÁSTICA ELABORADA A PARTIR DE MEZCLAS DE RESIDUOS DE ASERRÍN Y POLIETILENTEREFTALATO RECICLADO (PET RECICLADO)**". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"

  
Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez  
DIRECTOR



Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, septiembre 2015

Cc: Archivo  
VMMV/ale



Asociación Centroamericana de Asociaciones de Ingenieros de Arquitectura y de Plasteros





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 LAS PROPIEDADES FISICOMECAÑICAS DE LA MADERA PLÁSTICA ELABORADA A PARTIR DE MEZCLAS DE RESIDUOS DE ASERRÍN Y PLIETILENTEREFTALATO RECICLADO (PET RECICLADO)**, presentado por la estudiante universitaria: **Aurora María Ortíz Villalta**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE

Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
DECANO



Guatemala, Septiembre de 2015

/cc

## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Dios**

Por la vida que me ha concedido, llena de su amor. Por estar siempre a mi lado, guiando cada uno de mis pasos, dándome fortaleza y su bendición para alcanzar cada meta propuesta.

### **Mi familia**

Por las enseñanzas y valores que han inculcado en mí, para ser una mujer que camine de la mano de Dios, una profesional de éxito. Por todo el apoyo que me han brindado en el cumplimiento de cada una de mis metas.

### **Mis amigos**

Por ser parte de una nueva etapa de mi vida, por todo el apoyo para alcanzar un desarrollo como profesional.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Dios</b>	Por ser mi motor de vida y bendecirme al conceder los anhelos de mi corazón.
<b>Mis padres</b>	Porque desde pequeña me han enseñado a creer en mí misma, me han guiado y apoyado para alcanzar cada uno de mis sueños.
<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser la casa de estudios que me permite cumplir una meta más, ser una profesional de la ingeniería química.
<b>Escuela de Ingeniería Química</b>	Por brindar a los estudiantes las enseñanzas básicas para ser un profesional que pueda enfrentar los retos en un entorno empresarial.
<b>Compañeros de clase</b>	Por el apoyo continuo a lo largo de la carrera que nos formó como profesionales y futuros colegas.
<b>Ing. Jorge Godínez</b>	Por su amistad, enseñanzas, apoyo y asesoría en el desarrollo y culminación de mi carrera profesional.
<b>Laboratorio de Tecnología de la Madera</b>	Por prestar sus servicios y brindarme su apoyo durante el desarrollo de esta investigación.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	III
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
Hipótesis .....	XX
INTRODUCCIÓN .....	XXI
1. ANTECEDENTES .....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Madera .....	3
2.1.1. Propiedades específicas.....	3
2.1.2. Características anatómicas .....	4
2.1.3. Características organolépticas .....	4
2.1.4. Propiedades físicas .....	4
2.1.5. Propiedades mecánicas .....	4
2.2. Polímeros .....	5
2.3. Termoplásticos .....	6
2.3.1. Propiedades de los termoplásticos.....	7
2.4. Polietilentereftalato .....	8
2.5. Madera plástica .....	9
2.5.1. Características.....	9
2.5.2. Moldeo por compresión .....	10

3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	13
3.1.	Variables .....	13
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	14
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	15
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	16
3.5.	Técnica cualitativa y cuantitativa.....	17
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información.....	18
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	25
3.8.	Análisis estadístico.....	32
4.	RESULTADOS.....	35
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....	43
	CONCLUSIONES.....	47
	RECOMENDACIONES .....	49
	BIBLIOGRAFÍA.....	51
	APÉNDICES.....	53

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Densidad de formulación 60 % PET – 40 % residuos de aserrín, en función del tiempo de residencia en el horno .....	35
2.	Densidad de formulación 70 % PET – 30 % residuos de aserrín, en función del tiempo de residencia en el horno .....	36
3.	Densidad de formulación 80 % PET – 20 % residuos de aserrín, en función del tiempo de residencia en el horno .....	37
4.	Temperatura de inflamación para cada una de las formulaciones de madera plástica, en función del tiempo de residencia en el horno .....	38
5.	Fuerza de ruptura para cada una de las formulaciones de madera plástica, en función del tiempo de residencia en el horno .....	39
6.	Porcentaje de humedad de formulación 60 % PET – 40 % residuos de aserrín, en función del tiempo de residencia en el horno .....	40
7.	Porcentaje de humedad de formulación 70 % PET – 30 % residuos de aserrín, en función del tiempo de residencia en el horno .....	41
8.	Porcentaje de humedad de formulación 80 % PET – 20 % residuos de aserrín, en función del tiempo de residencia en el horno .....	42

### TABLAS

I.	Variables independientes y dependientes.....	14
II.	Datos recolectados para determinar la densidad de las probetas de madera plástica de formulación 60 % plástico y 40 % residuos de aserrín .....	19

III.	Datos recolectados para determinar la densidad de las probetas de madera plástica de formulación 70 % plástico y 30 % residuos de aserrín.....	19
IV.	Datos recolectados para determinar la densidad de las probetas de madera plástica de formulación 80 % plástico y 20 % residuos de aserrín.....	20
V.	Datos recolectados para determinar la inflamabilidad de las probetas de madera plástica de formulación 60 % plástico y 40 % residuos de aserrín.....	20
VI.	Datos recolectados para determinar la inflamabilidad de las probetas de madera plástica de formulación 70 % plástico y 30 % residuos de aserrín.....	21
VII.	Datos recolectados para determinar la inflamabilidad de las probetas de madera plástica de formulación 80 % plástico y 20 % residuos de aserrín.....	21
VIII.	Datos recolectados para determinar la fuerza de ruptura de las probetas de madera plástica de formulación 60 % plástico y 40 % residuos de aserrín .....	22
IX.	Datos recolectados para determinar la fuerza de ruptura de las probetas de madera plástica de formulación 70 % plástico y 30 % residuos de aserrín .....	22
X.	Datos recolectados para determinar la fuerza de ruptura de las probetas de madera plástica de formulación 80 % plástico y 20 % residuos de aserrín .....	23
XI.	Datos recolectados para determinar la dureza de las probetas de madera plástica de formulación 60 % plástico y 40 % residuos de aserrín.....	23

XII.	Datos recolectados para determinar la dureza de las probetas de madera plástica de formulación 70 % plástico y 30 % residuos de aserrín .....	24
XIII.	Datos recolectados para determinar la dureza de las probetas de madera plástica de formulación 80 % plástico y 20 % residuos de aserrín .....	24
XIV.	Datos recolectados para determinar el porcentaje de humedad de las probetas de madera plástica de formulación 60 % plástico y 40 % residuos de aserrín .....	24
XV.	Datos recolectados para determinar el porcentaje de humedad de las probetas de madera plástica de formulación 70 % plástico y 30 % residuos de aserrín .....	25
XVI.	Datos recolectados para determinar el porcentaje de humedad de las probetas de madera plástica de formulación 80 % plástico y 20 % residuos de aserrín .....	25
XVII.	Datos obtenidos de densidad, de las probetas de madera plástica de formulación 60 % plástico y 40 % residuos de aserrín .....	26
XVIII.	Datos obtenidos de densidad, de las probetas de madera plástica de formulación 70 % plástico y 30 % residuos de aserrín .....	26
XIX.	Datos obtenidos de densidad, de las probetas de madera plástica de formulación 80 % plástico y 20 % residuos de aserrín .....	27
XX.	Datos obtenidos de inflamabilidad, de las probetas de madera plástica de formulación 60 % plástico y 40 % residuos de aserrín .....	27
XXI.	Datos obtenidos de inflamabilidad, de las probetas de madera plástica de formulación 70 % plástico y 30 % residuos de aserrín .....	28
XXII.	Datos obtenidos de inflamabilidad, de las probetas de madera plástica de formulación 80 % plástico y 20 % residuos de aserrín .....	28
XXIII.	Datos obtenidos de fuerza de ruptura, de las probetas de madera plástica de formulación 60 % plástico y 40 % residuos de aserrín .....	29

XXIV.	Datos obtenidos de fuerza de ruptura, de las probetas de madera plástica de formulación 70 % plástico y 30 % residuos de aserrín .....	29
XXV.	Datos obtenidos de fuerza de ruptura, de las probetas de madera plástica de formulación 80 % plástico y 20 % residuos de aserrín .....	30
XXVI.	Datos obtenidos de dureza, en las probetas de madera plástica de formulación 60 % plástico y 40 % residuos de aserrín.....	30
XXVII.	Datos obtenidos de dureza, en las probetas de madera plástica de formulación 70 % plástico y 30 % residuos de aserrín.....	31
XXVIII.	Datos obtenidos de dureza, en las probetas de madera plástica de formulación 80 % plástico y 20 % residuos de aserrín.....	31
XXIX.	Datos obtenidos d el porcentaje de humedad, de las probetas de madera plástica de formulación 60% plástico y 40% residuos de aserrín.....	31
XXX.	Datos obtenidos del porcentaje de humedad, de las probetas de madera plástica de formulación 70 % plástico y 30 % residuos de aserrín.....	32
XXXI.	Datos obtenidos del porcentaje de humedad, de las probetas de madera plástica de formulación 80 % plástico y 20 % residuos de aserrín.....	32
XXXII.	Análisis de varianza para el experimento de 2 factores con $n$ número de replicas .....	33
XXXIII.	Factores de contraste obtenidos para el experimento de 2 factores con $n$ número de replicas.....	34
XXXIV.	Dureza para cada una de las formulaciones de madera plástica con base en la prueba Janka.....	42

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>cm</b>	Centímetro
<b>cm<sup>3</sup></b>	Centímetro cúbico
<b>CHE</b>	Contenido de humedad en equilibrio
<b><math>\rho</math></b>	Densidad
<b>f</b>	Factor de contraste
<b>F</b>	Fuerza
<b>°C</b>	Grados centígrados
<b>g</b>	Gramo
<b>kg</b>	Kilogramo
<b>mm</b>	Milímetros
<b>min</b>	Minutos
<b>N</b>	Newton
<b>%H</b>	Porcentaje de humedad
<b>%R</b>	Porcentaje de humedad seca
<b>%D</b>	Porcentaje de materia seca
<b>PSF</b>	Punto de saturación de las fibras
<b>T</b>	Temperatura
<b>t</b>	Tiempo
<b>psi</b>	Unidad para medir presión en el sistema americano de ingeniería



## GLOSARIO

<b>Aglomerante</b>	Material capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto, por efectos de tipo exclusivamente físico.
<b>Aglutinante</b>	Material que se emplea para adherir distintos elementos.
<b>Aislante</b>	Material que es mal conductor del calor y la electricidad.
<b>Anisótropo</b>	Que ofrece distintas propiedades cuando se examina o ensaya en direcciones diferentes.
<b>Anova</b>	Análisis de varianza es una colección de modelos estadísticos y sus procedimientos asociados, en el cual la varianza está particionada en ciertos componentes debidos a diferentes variables explicativas.
<b>Aserrín</b>	Polvo o conjunto de partículas que se desprenden de la madera al serrarla.
<b>ASTM</b>	Normas técnicas internacionales para servicios, materiales y productos

<b>Celulosa</b>	Sustancia sólida, blanca, amorfa, inodora y sin sabor, insoluble en agua, alcohol y éter, que constituye la membrana celular de muchos hongos y vegetales. Se emplea en la fabricación de papel, tejidos, explosivos, barnices, entre otros.
<b>Cohesión</b>	Unión entre las moléculas de un cuerpo, debida a la fuerza de atracción molecular
<b>Combustión</b>	Reacción química que se produce entre el oxígeno y un material oxidable, que va acompañada del desprendimiento de energía y habitualmente se manifiesta por incandescencia o llama.
<b>Compresión</b>	Efecto de comprimir o comprimirse.
<b>Condensar</b>	Hacer más densa o espesa una sustancia, eliminando parte del agua que contiene.
<b>Correlación</b>	Correspondencia o relación recíproca entre dos o más acciones o fenómenos.
<b>Corrosión</b>	Efecto de destruir progresivamente una cosa penetrando de afuera hacia adentro.
<b>Cristalización</b>	Acción de adquirir la forma y estructura cristalina que es propia de su clase.

<b>Dilatación</b>	Hacer que algo ocupe más espacio del que ocupa.
<b>Dureza</b>	Grado de resistencia que opone un mineral a ser rayado por otro.
<b>Elasticidad</b>	Propiedad de un cuerpo sólido para recuperar su forma cuando cesa la fuerza que la altera.
<b>Enlace covalente</b>	Enlace entre dos átomos o grupos de átomos, se produce cuando estos átomos se unen, para alcanzar el octeto estable, comparten electrones del último nivel.
<b>Ensayo</b>	Prueba que se hace para determinar si una cosa funciona o resulta como se desea.
<b>Equilibrio</b>	Estado de inmovilidad de un cuerpo sometido a dos o más fuerzas de la misma intensidad que actúan en sentido opuesto, por lo que se contrarrestan o anulan.
<b>Estructura amorfa</b>	Se dice que algo es amorfo cuando se presenta sin una forma regular, o en su defecto, bien determinada.
<b>Fisura</b>	Dificultad o desacuerdo que amenaza la solidez o la resolución de una cosa.

<b>Flexibilidad</b>	Capacidad de doblarse un cuerpo fácilmente y sin que exista peligro de que se rompa.
<b>Fuerza intermolecular</b>	Fuerzas que mantienen unidas a las moléculas eléctricamente neutras.
<b>Fundición</b>	Efecto de convertir una sustancia sólida en líquida por la acción del calor, especialmente un metal.
<b>Fusión</b>	Paso de un cuerpo del estado sólido al líquido por la acción del calor.
<b>Higroscópico</b>	Cuerpo que tiene la propiedad de absorber la humedad.
<b>Homogénea</b>	Que está formado por elementos con características comunes referidas a su clase o naturaleza, lo que permite establecer entre ellos una relación de semejanza y uniformidad.
<b>Ignición</b>	Inicio de una combustión.
<b>Impermeable</b>	Que no permite el paso de la humedad, el agua u otro líquido.
<b>Impudrescible</b>	Que no puede pudrirse o no se pudre fácilmente.

<b>Lignina</b>	Sustancia natural que forma parte de la pared celular de muchas células vegetales, a las cuales da dureza y resistencia.
<b>Materia prima</b>	Sustancia natural o artificial que se transforma industrialmente para crear un producto. Cosa que potencialmente sirve para crear algo.
<b>Monómero</b>	Molécula simple, generalmente de peso molecular bajo, que forma cadenas lineales o ramificadas de dos, tres o más unidades.
<b>Muestra</b>	Parte o cantidad pequeña de una cosa que se considera representativa del total y que se toma o se separa de ella con ciertos métodos para someterla a estudio, análisis o experimentación.
<b>Óptimo</b>	Que es extraordinariamente bueno o el mejor, especialmente en lo que se refiere a las condiciones o características de una cosa, por lo cual resulta muy difícil o imposible encontrar algo más adecuado.
<b>Parámetro</b>	Elemento o dato importante desde el que se examina un tema, cuestión o asunto.
<b>Partícula</b>	Cuerpo material de pequeñas dimensiones constituyente de la materia.

<b><i>Pellet</i></b>	Comprimido sólido que se implanta en el tejido subcutáneo y es absorbido lentamente por el organismo.
<b>PET</b>	Un tipo de plástico transparente muy usado en envases. También se llama polietileno tereftalato.
<b>Poliéster</b>	Resina plástica que se obtiene mediante una reacción química y que es muy resistente a la humedad y a los productos químicos.
<b>Polímero</b>	Sustancia química que resulta de un proceso de polimerización.
<b>Presión</b>	Fuerza que ejerce un gas, un líquido o un sólido sobre una superficie.
<b>Reacción</b>	Cambio producido como respuesta a un estímulo.
<b>Resina</b>	Sustancia orgánica de consistencia pastosa, pegajosa, transparente o translúcida, que se solidifica en contacto con el aire; es de origen vegetal o se obtiene artificialmente mediante reacciones de polimerización.
<b>Resistencia</b>	Capacidad de recibir una fuerza o presión, sin sufrir daño o alteración.

<b>Rigidez</b>	Capacidad de resistencia de un cuerpo a doblarse o torcerse por la acción de fuerzas exteriores que actúan sobre su superficie.
<b>Saturación</b>	Efecto de ocupar un material hasta el límite de su capacidad.
<b>Tamiz</b>	Cedazo muy tupido.
<b>Termoestable</b>	Que no se altera fácilmente por la acción del calor.
<b>Termoplástico</b>	Material que se ablanda por la acción del calor y se endurece al enfriarse, de forma reversible.
<b>Viscosidad</b>	Consistencia espesa y pegajosa de una cosa.



## RESUMEN

El presente trabajo de graduación evaluó las propiedades físico-mecánicas de la madera plástica, elaborada a partir de mezclas de residuos de aserrín con polietileno tereftalato reciclado (PET).

La evaluación de las propiedades se realizó con base en las normas ASTM, se llevó a cabo fabricando probetas con tres formulaciones en diferentes proporciones de cada una de las materias primas, con tres tiempos diferentes de residencia en el horno para cada formulación, a una temperatura de horneado y presión de compresión constante en cada una de las probetas.

La elaboración de las probetas y cada una de sus pruebas se llevaron a cabo en el Laboratorio de Tecnología de la Madera, con equipo proporcionado por el mismo para el análisis de cada una de las muestras. De esta manera se determinó la calidad de cada una de las formulaciones propuestas.

En total, se fabricaron 36 probetas de aproximadamente 10 cm de ancho por 1,5 cm de profundidad, por el método de moldeo por compresión, sometidas a pruebas de dureza (ASTM D143-09), ruptura (ASTM D143-09) e inflamación (ASTM 19 29-12), para su evaluación. Asimismo, se determinó la densidad (ASTM D2395-07) y el porcentaje de humedad (ASTM D4442-07) de cada una de las probetas.

El diseño experimental se realizó con un nivel de confianza del 95 %, en un lapso promedio de 68 días. Se obtuvo que sí existe variación significativa entre las tres distintas formulaciones propuestas y se determinó que la

formulación compuesta por 60 % PET es la más apropiada para elaborar madera plástica a partir de mezclas de aserrín y polietilentereftalato reciclado, con un tiempo adecuado de 90 minutos para residencia en el horno.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Evaluar las propiedades físico-mecánicas de la madera plástica obtenida a partir de residuos aserrín combinado con polietileno tereftalato reciclado.

### **Específicos**

1. Elaborar formulaciones a distintas proporciones de residuos de aserrín y PET reciclado.
2. Evaluar la densidad del producto terminado para cada una de las formulaciones propuestas de residuos de aserrín y PET reciclado.
3. Evaluar la humedad del producto terminado para cada una de las formulaciones propuestas de residuos de aserrín y PET reciclado.
4. Evaluar la dureza del producto terminado para cada una de las formulaciones propuestas de residuos de aserrín y PET reciclado.
5. Determinar el tiempo de residencia del producto final en el horno, adecuado para la mezcla de formación de madera plástica.
6. Determinar la temperatura adecuada en el horno para el producto final de la mezcla de formación de madera plástica.

7. Determinar el tiempo de prensado que se requiere para la obtención de madera plástica en cada una de las formulaciones.
8. Comparar cada una de las propiedades físicomecánicas entre las distintas formulaciones preparadas de madera plástica.

## **Hipótesis**

Es posible obtener una formulación adecuada de madera plástica a partir de mezclas de aserrín y PET reciclado, para poder reemplazar a la madera pura en algunas de sus aplicaciones.

### **Hipótesis alternas**

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

### **Hipótesis nula**

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

## INTRODUCCIÓN

En la industria guatemalteca existe gran competitividad debido a la globalización y modernización; y la materia prima es un factor determinante para el éxito. Muchos recursos naturales no son aprovechados en su totalidad, sin embargo, pueden ser utilizados para generar nuevas fuentes de materia prima para las industrias a un menor costo y empleando recursos que son desechados por otros; como los residuos de aserrín.

Asimismo, el polietilentereftalato, un polímero que es considerado un material no beneficioso al medio ambiente, puede emplearse como material reciclado para la integrarse nuevamente al ciclo productivo como materia prima.

La producción de madera plástica a partir de residuos de aserrín combinados con PET reciclado es una alternativa para las industrias guatemaltecas, ya que Guatemala cuenta con una gran fuente de riqueza natural, que puede ser aprovechada y reciclada, lo que contribuye a preservar las riquezas naturales del país.

La producción de madera plástica permite la fabricación de artículos de utilidad y beneficio al consumidor a un menor costo y con características similares a las de la madera pura. Además, es una alternativa para el medio ambiente, ya que a mayor demanda de madera, se ven afectados los bosques y todo el ecosistema que conforman. Por otro lado, se contribuye a la reutilización del polietilentereftalato como materia prima y evitando que este sea perjudicial al medio ambiente.

La creación de madera plástica surge de la necesidad de aprovechar recursos, volviéndolos renovables y contribuir al desarrollo. Se han realizado productos de imitación madera compuestos por materiales plásticos al 100 % debido a las propiedades de los mismos al fusionarse. Por lo que se ha planteado la opción de crear un tipo de madera plástica que contenga residuos de aserrín en su acabado final, dándole mayor semejanza a la madera pura.

## 1. ANTECEDENTES

En Estados Unidos, hace más de 15 años se comercializa madera plástica, conocida como *plastic lumber* o *plastic wood*, siendo bastante popular en muebles de exterior y juegos infantiles. Sin embargo, los primeros compuestos de este tipo de madera se vieron por primera vez durante los años 1960 en marcos de ventanas y puertas, como una alternativa más económica de producción.

El país con mayor producción de este material es Estados Unidos de América, aunque en Europa su investigación y desarrollo ha aumentado en los últimos años, debido a que el uso de este tipo de materiales puede disminuir costos, ya que se aprovecha todo el desperdicio de madera y madera reciclada.

Actualmente, en Guatemala existe una industria, Maderplast, S. A., que se dedica a fabricar productos 100 % a base de plástico reciclado (polietileno de alta densidad y otros termoplásticos combinados) para la producción de un sustituto de la madera, a través de procesos de calentamiento y moldeo.

Sin embargo, no existen antecedentes de un proyecto para formulaciones de residuos de aserrín con PET reciclado con el fin de obtener un tipo de madera plástica que sea empleado en la industria, sustituyendo parcialmente algunas de las aplicaciones de la madera pura.

Los trabajos de investigación profesionales que abarcan estudios de elaboración de madera plástica, con análisis de formulaciones y parámetros fisicomecánicos, utilizando mezclas a base de aserrín con polímeros, han sido

elaborados en la Universidad de San Carlos de Guatemala. Dichos proyectos corresponden a la autoría de:

- Ing. Qco. Mauricio Valentino Rivera Tello, con el tema *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*, en el 2014.
- Inga. Qca. María Eugenia Guerra Salazar, con el tema. *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 reciclado primario*, en el 2014.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Madera**

Es un material que se obtiene de los troncos de los árboles y se utiliza desde hace mucho tiempo, tanto para construir y como combustible, ya que se encuentra disponible en el entorno. Existen muchas variedades de madera, tantas como tipos de árboles, cada una con unas características que la hacen propicia para determinados usos.

La madera es un material muy versátil, se emplea en la fabricación de muebles, herramientas y en la construcción, así como para elaborar objetos de artesanía y decoración. La porosidad le convierte en un buen aislante térmico. Las formas comerciales de la madera pueden ser: listones o tablones de madera natural o bien tableros artificiales de contrachapado o aglomerados.

Los diferentes tipos de madera poseen ciertas características en común, tales como su arreglo celular y la composición de sus paredes celulares, basándose en celulosa, hemicelulosa y lignina.

#### **2.1.1. Propiedades específicas**

- Variaciones de apariencia: color, textura, veteado, entre otras.
- Variaciones de peso, dureza, resistencia, contracciones, permeabilidad, trabajabilidad, acabado, entre otras.
- Variaciones en su durabilidad natural y en la presencia de sustancias químicas llamadas extractivos.

### **2.1.2. Características anatómicas**

Corteza, cambium, albura, duramen, médula, anillos de crecimiento, parénquima, radios, vasos, fibras, textura, grano.

### **2.1.3. Características organolépticas**

Aquellas que se pueden apreciar o percibir a través de los sentidos: color, olor, sabor, brillo.

### **2.1.4. Propiedades físicas**

- Contenido de humedad: el contenido de humedad de equilibrio (CHE) es cuando la madera expuesta al aire empieza a ganar o perder humedad hasta alcanzar el equilibrio entre su contenido de humedad y la humedad relativa del sitio o lugar de servicio.
- Contracción e hinchazón: por su origen orgánico y sus características de higroscopicidad, la madera puede ganar o perder humedad con facilidad. Cuando el punto de saturación de las fibras (PSF) disminuye, la madera sufre cambios dimensionales.

### **2.1.5. Propiedades mecánicas**

La madera es un material anisótropo formado por tubos huecos con una estructura ideal para resistir tensiones paralelas a la fibra. La madera tiene una muy elevada resistencia a la flexión. La relación resistencia/peso propio es 1,3 veces superior al acero y 10 veces superior al hormigón. La resistencia a la tracción y compresión paralelas a la fibra es buena en la madera. Las

resistencias y módulos de elasticidad en la dirección paralela a la fibra son mucho más elevados que en la dirección perpendicular.

- **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) o a ser trabajada (cepillo, sierra, gubia, formón).
- **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 a la compresión:** la madera, en la dirección de las fibras, resiste menos a compresión que a tracción. La alta resistencia a la compresión es necesaria para cimientos y soportes en construcción.

## **2.2. Polímeros**

La materia está formada por moléculas que pueden ser de tamaño normal o moléculas gigantes llamadas polímeros. Los polímeros se producen por la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas denominadas monómeros que forman enormes cadenas de las formas más diversas, algunas parecen fideos, otras tienen ramificaciones, otras se asemejan a las escaleras de mano y otras son como redes tridimensionales.

Lo que distingue a los polímeros de los materiales constituidos por moléculas de tamaño normal, son sus propiedades mecánicas. En general, los polímeros tienen una excelente resistencia mecánica debido a que las grandes cadenas poliméricas se atraen. Las fuerzas de atracción intermoleculares dependen de la composición química del polímero y pueden ser de varias clases.

### **2.3. Termoplásticos**

Son aquellos materiales que están formados por polímeros que se encuentran unidos mediante fuerzas intermoleculares o fuerzas de Van der Waals, formando estructuras lineales o ramificadas.

En función del grado de las fuerzas intermoleculares que se producen entre las cadenas poliméricas, estas pueden adoptar dos tipos diferentes de estructuras, estructuras amorfas o estructuras cristalinas, siendo posible la existencia de ambas estructuras en un mismo material termoplástico.

- Estructura amorfa: las cadenas poliméricas adquieren una estructura liada, semejante a de la un ovillo de hilos desordenados, dicha estructura amorfa es la responsable directa de las propiedades elásticas de los materiales termoplásticos.
- Estructura cristalina: las cadenas poliméricas adquieren una estructura ordenada y compacta, se pueden distinguir principalmente estructuras con forma lamelar y con forma micelar. Dicha estructura cristalina es la responsable directa de las propiedades mecánicas de resistencia frente a esfuerzos o cargas, así como la resistencia a las temperaturas de los materiales termoplásticos.

Si el material termoplástico dispone de una alta concentración de polímeros con estructuras amorfas, dicho material tendrá una pobre resistencia frente a cargas pero una excelente elasticidad. Si, por el contrario, el material termoplástico dispone de una alta concentración de polímeros con estructura cristalina, el material será muy resistente y fuerte, incluso superior a los materiales termoestables, pero con poca elasticidad, aportándole la característica de fragilidad en dichos materiales.

### **2.3.1. Propiedades de los termoplásticos**

Las propiedades del material de un polímero termoplástico pueden ajustarse para satisfacer las necesidades de una aplicación específica mediante la mezcla de la resina termoplástica con otros componentes.

- Comportamiento elástico: en los polímeros termoplásticos, la deformación elástica es el resultado de dos mecanismos. Un esfuerzo aplicado hace que se estiren y distorsionen los enlaces covalentes de las cadenas, permitiendo que estas se alarguen elásticamente.
- Comportamiento plástico: los polímeros termoplásticos se deforman plásticamente cuando se excede al esfuerzo de cadencia
- Viscoelasticidad: la capacidad de un esfuerzo para provocar el deslizamiento de cadenas y la deformación plástica está relacionada con el tiempo y la rapidez de deformación.

## 2.4. Polietilentereftalato

Más conocido por sus siglas en inglés PET, *polyethylene terephthalate*, es un tipo de plástico muy usado en envases de bebidas y textiles.

Químicamente, el PET es un polímero que se obtiene mediante una reacción de policondensación entre el ácido y el etilenglicol. Perteneció al grupo de materiales sintéticos denominados poliésteres.

Sus características más relevantes son:

- Alta transparencia, aunque admite cargas de colorantes.
- Alta resistencia al desgaste y corrosión.
- Muy buen coeficiente de deslizamiento.
- Buena resistencia química y térmica.
- Muy buena barrera a CO<sub>2</sub>, aceptable barrera a O<sub>2</sub> y humedad.
- Reciclable, aunque tiende a disminuir su viscosidad con la historia térmica.

Las propiedades físicas del PET y su capacidad para cumplir diversas especificaciones técnicas han sido las razones por las que el material haya alcanzado un desarrollo relevante en la producción de fibras textiles y en la fabricación de una gran diversidad de envases, especialmente de botellas, bandejas, flejes y láminas.

## **2.5. Madera plástica**

Es un material fabricado a partir de residuos de madera y plásticos 100 % reciclados seleccionados de alta calidad, de forma que se aprovechan las ventajas estéticas y calidez de la madera natural pero mejorando sus propiedades al incorporar las ventajas del plástico: alta durabilidad, sin mantenimiento.

Los productos finales pueden ser empleados de la misma manera que la madera natural, principalmente para uso en exteriores y ambientes salinos, con numerosas ventajas.

La madera fabricada con plástico reciclado se caracteriza por ser un material 100 % reciclado y reciclable, que procede del reciclaje de residuos y evita la tala de árboles, por lo que es 100 % ecológico.

La ventaja es que tiene la apariencia de la madera con todas las propiedades del plástico: no se pudre, no se enmohece, no lo atacan los insectos y el material resiste intacto bajo condiciones climatológicas extremas.

El material de madera de plástico reciclado está compuesto de residuos de madera y plásticos 100 % reciclados de alta calidad, procedentes de envases domésticos e industriales.

### **2.5.1. Características**

Entre las características propias de la madera de plástico reciclado, que la diferencian de la madera natural, se encuentran:

- Impermeable, no deja pasar el agua y la humedad
- Anticorrosivo, no se deteriora bajo la acción de productos químicos
- Imputrefascible, no se pudre al aire o en contacto con arena o agua
- Resistente a la intemperie, bajo cualquier condición meteorológica
- Buena resistencia mecánica, material duradero
- Higiénico, inmune a microorganismos, roedores e insectos.
- Piroresistente, alta resistencia al fuego
- Seguro, no se agrieta ni produce astillas

### **2.5.2. Moldeo por compresión**

Es un método de moldeo en el que el material de moldeo, en general precalentado, es colocado en la cavidad del molde abierto. El molde se cierra, se aplica calor y presión para forzar al material a entrar en contacto con todas las áreas del molde, mientras que el calor y la presión se mantiene hasta que el material de moldeo se ha curado.

El proceso se emplea en resinas termoestables en un estado parcialmente curado, ya sea en forma de *pellets*, masilla o preformas.

El moldeo por compresión es un método de alta presión, adecuado para el moldeo de piezas complejas, de alta resistencia, con refuerzos de fibra de vidrio.

Los compuestos termoplásticos, aunque en menor medida, también pueden ser moldeados por compresión con refuerzos de cintas unidireccionales, tejidos, fibras orientadas al azar o de hilos cortados. La ventaja de moldeo por compresión es su capacidad para moldear piezas grandes, bastante intrincadas o complejas. Además, es uno de los métodos de

más bajo costo en comparación con el moldeo por otros métodos, como moldeo por transferencia y por inyección, por otra parte se desperdicia poco material.



### **3. DISEÑO METODOLÓGICO**

Con base en estudios anteriores de formulaciones para mezclas de aserrín con polímeros distintos y a pruebas preliminares en la elaboración de madera plástica a base de residuos de aserrín con polietilentereftalato reciclado, se seleccionó el siguiente grupo de variables, que reportaron datos concluyentes de las propiedades físicomecánicas de madera plástica elaborada con dichas materias primas.

#### **3.1. Variables**

Durante el estudio e investigación de elaboración de madera plástica, se estableció como variable independiente la formulación de fabricación, siendo cada una de las formulaciones a distintas proporciones de residuos de aserrín y PET reciclado.

Se realizaron tres formulaciones distintas: 80 % de PET reciclado y 20 % de residuos de aserrín, 70-30 % y 60-40 %, cada una de ellas a una temperatura de horneado constante de 300 °C y una presión de compresión constante de 10 toneladas.

Asimismo, se tomó como variable independiente, el tiempo de residencia en el horno de cada formulación preparada; siendo necesario analizar tres tiempos para cada formulación. Se analizaron tiempos de 75, 90 y 105 minutos respectivamente.

En cada una de las formulaciones preparadas, se analizó como variables dependientes o de respuesta, la densidad, el porcentaje de humedad, la fuerza de ruptura y la dureza de la probeta.

Tabla I. **Variables independientes y dependientes**

VARIABLES INDEPENDIENTES		VARIABLES DEPENDIENTES				
		Densidad	Humedad	Ruptura	Dureza	Inflamabilidad
Formulación 1	Tiempo de residencia 1	x	x	x	x	x
Formulación 2	Tiempo de residencia 2	x	x	x	x	x
Formulación 3	Tiempo de residencia 3	x	x	x	x	x

Fuente: elaboración propia.

### 3.2. Delimitación del campo de estudio

El tema se desarrolló en el área de investigación ambiental, abarcando tecnología de la madera y el estudio de polímeros reciclados.

Las pruebas se llevaron a cabo a en la sección de Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería, USAC, a nivel laboratorio. Se utilizó como materia prima aserrín, el cual se obtuvo del Laboratorio de Tecnología y PET reciclado, que se compró en hojuelas a una industria recicladora nacional.

Para la evaluación de las propiedades fisicomecánicas de las distintas formulaciones de madera plástica, se realizaron tres ensayos repetitivos en cada muestra, con base en normas ASTM, con el fin de obtener datos suficientes que permitieran un análisis correcto, como método de aceptación para el consumidor final.

Las pruebas fisicomecánicas de las probetas realizadas a distintas formulaciones, se limitaron a verificar si existen diferencias significativas en las proporciones de mezcla utilizadas y determinar una formulación adecuada de fabricación que cumpla con las cualidades de la madera pura.

Con el compendio de datos obtenidos como resultado de las pruebas, se analizaron y determinaron los parámetros de producción adecuados para la elaboración de madera plástica a base de mezclas de aserrín y PET reciclado que cumplen con características similares a las de la madera pura.

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

El proyecto de investigación se llevó a cabo bajo la dirección de:

Asesor : Ing. Jorge Emilio Godínez

Investigador: tesista Aurora María Ortiz Villalta

Colaboradores: encargados del Laboratorio de Tecnología de la Madera

### 3.4. Recursos materiales disponibles

- Materia prima:
  - Residuos de aserrín
  - PET reciclado en hojuelas
  
- Equipo:
  - Bata de laboratorio
  - Guantes de cuero
  - Bolsas plásticas identificadas
  - 6 moldes de acero inoxidable
  - 6 moldes de aluminio
  - Tamices núm. 30, 10, 4 y 3/8
  - Balanza analítica
  - Papel aluminio
  - Horno eléctrico
  - Prensa hidráulica
  - Vernier eléctrico
  - Termómetro infrarrojo
  - Plancha eléctrica
  - 3 crisoles
  - Pinzas
  - Balín
  - Balanza de humedad
  - Equipo de prueba Yanka

### 3.5. Técnica cualitativa y cuantitativa

El proyecto fue un estudio experimental en el que se compararon las propiedades físicomecánicas entre cada una de las formulaciones preparadas, para determinar cuál es la mejor opción de mezcla para la formación de madera plástica, en cuanto a densidad, inflamabilidad, porcentaje de humedad, dureza y fuerza de ruptura, en comparación con la madera pura, para que pueda ser un producto de calidad. Se basó en los procedimientos ASTM siguientes:

- Densidad del producto final:

*ASTM D2395-07ae1: Standard methods for specific gravity of wood and wood-base materials.*

- Humedad:

*ASTM D4442-07: Standard test methods for direct moisture content measurement of wood and wood-base materials.*

- Resistencia a la ruptura:

*ASTM D143-09: Standard methods for small clear specimens of timber, section 12.*

- Temperatura de inflamación:

*ASTM D1929-12: Standard test methods for determining ignition temperature of plastics, UNE 23010.*

- Dureza:

*ASTM D143-09: Standard methods for small clear specimens of timber, section 13.*

Para ello, se analizó el tamaño de partícula adecuado en la formulación, el porcentaje de mezcla y el tiempo de horneado óptimo, que cumplan con la aceptabilidad del consumidor final.

### **3.6. Recolección y ordenamiento de la información**

La recolección de la información tuvo como base el cumplimiento del análisis estadístico realizado para la obtención del 95 % de nivel de confianza requerido en el estudio.

Se tomaron, como parámetros constantes de producción, la temperatura de horneado a 300 °C y una presión de compresión de 10 toneladas.

Para las formulaciones preparadas, se utilizaron partículas de aserrín obtenidas del tamiz 30, 10 y 3/8 en relación 1:1:1 respectivamente. Mientras que para las partículas en hojuela de plástico se utilizó un tamiz 3/8 y 4 en relación 2:1 respectivamente. Se realizaron probetas a tres tiempos distintos de residencia en el horno, siendo ellos 75, 90 y 105 minutos, con tres repeticiones cada uno.

Se realizaron y analizaron en total 36 probetas, con diámetro de 10,5 cm y una profundidad de 1,5 cm aproximadamente.

Tabla II. **Datos recolectados para determinar la densidad de las probetas de madera plástica de formulación 60 % plástico y 40 % residuos de aserrín**

TIEMPO [min]	MUESTRA	ALTURA [cm]	DIAMETRO [cm]	MASA [g]
75	1	1,508	10,747	134,6
	2	1,471	10,788	135,28
	3	1,803	10,85	134,21
90	1	1,535	10,816	138,21
	2	1,255	10,845	124,95
	3	1,481	10,765	122,53
105	1	1,292	10,749	122,34
	2	1,427	10,933	126,23
	3	1,358	10,728	126,62

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Datos recolectados para determinar la densidad de las probetas de madera plástica de formulación 70 % plástico y 30 % residuos de aserrín**

TIEMPO [min]	MUESTRA	ALTURA [cm]	DIAMETRO [cm]	MASA [g]
75	1	1,493	10,742	130,61
	2	1,95	10,789	129,67
	3	1,558	10,707	137,3
90	1	1,476	10,761	132,18
	2	1,463	10,748	138,85
	3	1,459	10,679	137,29
105	1	1,391	10,795	118,38
	2	1,807	10,665	127,96
	3	1,457	10,706	128,62

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Datos recolectados para determinar la densidad de las probetas de madera plástica de formulación 80 % plástico y 20 % residuos de aserrín**

TIEMPO [min]	MUESTRA	ALTURA [cm]	DIAMETRO [cm]	MASA [g]
75	1	1,484	10,804	127,67
	2	1,873	10,902	130,47
	3	1,18	10,721	129,46
90	1	1,973	10,499	137,49
	2	1,553	10,767	135,54
	3	1,356	10,743	124,32
105	1	1,31	10,803	127,78
	2	0,969	10,802	125,24
	3	1,465	10754	131,32

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Datos recolectados para determinar la inflamabilidad de las probetas de madera plástica de formulación 60 % plástico y 40 % residuos de aserrín**

TIEMPO [min]	MUESTRA	TEMPERATURA PROBETA [°C]
75	1	275
	2	281
	3	277
90	1	280
	2	276
	3	280
105	1	278
	2	282
	3	278

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Datos recolectados para determinar la inflamabilidad de las probetas de madera plástica de formulación 70 % plástico y 30 % residuos de aserrín**

TIEMPO [min]	MUESTRA	TEMPERATURA PROBETA [°C]
75	1	260
	2	267
	3	257
90	1	268
	2	264
	3	260
105	1	271
	2	276
	3	268

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Datos recolectados para determinar la inflamabilidad de las probetas de madera plástica de formulación 80 % plástico y 20 % residuos de aserrín**

TIEMPO [min]	MUESTRA	TEMPERATURA PROBETA [°C]
75	1	230
	2	238
	3	232
90	1	236
	2	234
	3	230
105	1	230
	2	232
	3	236

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Datos recolectados para determinar la fuerza de ruptura de las probetas de madera plástica de formulación 60 % plástico y 40 % residuos de aserrín**

TIEMPO [min]	MUESTRA	FUERZA [Kg]
75	1	26
	2	24
	3	26
90	1	28
	2	22
	3	22
105	1	28
	2	30
	3	26

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Datos recolectados para determinar la fuerza de ruptura de las probetas de madera plástica de formulación 70 % plástico y 30 % residuos de aserrín**

TIEMPO [min]	MUESTRA	FUERZA [Kg]
75	1	20
	2	22
	3	22
90	1	22
	2	20
	3	18
105	1	20
	2	18
	3	22

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Datos recolectados para determinar la fuerza de ruptura de las probetas de madera plástica de formulación 80 % plástico y 20 % residuos de aserrín**

TIEMPO [min]	MUESTRA	FUERZA [Kg]
75	1	16
	2	12
	3	14
90	1	14
	2	18
	3	14
105	1	12
	2	12
	3	14

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Datos recolectados para determinar la dureza de las probetas de madera plástica de formulación 60 % plástico y 40 % residuos de aserrín**

TIEMPO: 75 min		TIEMPO: 90 min		TIEMPO: 105 min	
FUERZA [psi]	ALTURA [mm]	FUERZA [psi]	ALTURA [mm]	FUERZA [psi]	ALTURA [mm]
300	1	300	0	300	0
600	2,5	600	1	600	0,5
900	4	900	1,5	900	1
-	-	1200	2	1200	1,5
-	-	1500	2,5	-	-

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Datos recolectados para determinar la dureza de las probetas de madera plástica de formulación 70 % plástico y 30 % residuos de aserrín**

TIEMPO: 75 min		TIEMPO: 90 min		TIEMPO: 105 min	
FUERZA [psi]	ALTURA [mm]	FUERZA [psi]	ALTURA [mm]	FUERZA [psi]	ALTURA [mm]
300	1	300	1	300	1,5
600	1,5	600	1	-	-
900	2	900	1,5	-	-

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Datos recolectados para determinar la dureza de las probetas de madera plástica de formulación 80 % plástico y 20 % residuos de aserrín**

TIEMPO: 75 min		TIEMPO: 90 min		TIEMPO: 105 min	
FUERZA [psi]	ALTURA [mm]	FUERZA [psi]	ALTURA [mm]	FUERZA [psi]	ALTURA [mm]
300	1,5	300	1,5	300	1
-	-	600	3	600	2

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Datos recolectados para determinar el porcentaje de humedad de las probetas de madera plástica de formulación 60 % plástico y 40 % residuos de aserrín**

TIEMPO [min]	HUMEDAD/SECO [%R]	MATERIA SECA [%D]	HUMEDAD [%M]
75	2,481	95,579	2,42
90	1,896	98,14	1,86
105	1,091	98,91	1,079

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Datos recolectados para determinar el porcentaje de humedad de las probetas de madera plástica de formulación 70 % plástico y 30 % residuos de aserrín**

TIEMPO [min]	HUMEDAD/SECO [%R]	MATERIA SECA [%D]	HUMEDAD [%M]
75	2,19	97,856	2,144
90	1,929	98,07	1,11
105	0,991	99,19	0,981

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Datos recolectados para determinar el porcentaje de humedad de las probetas de madera plástica de formulación 80 % plástico y 20 % residuos de aserrín**

TIEMPO [min]	HUMEDAD/SECO [%R]	MATERIA SECA [%D]	HUMEDAD [%M]
75	2,229	97,82	2,18
90	1,793	98,239	1,761
105	1,12	98,892	1,108

Fuente: elaboración propia.

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

A continuación se dará un informe de los resultados.

Tabla XVII. **Datos obtenidos de densidad, de las probetas de madera plástica de formulación 60 % plástico y 40 % residuos de aserrín**

TIEMPO [min]	MUESTRA	DENSIDAD [g/cm <sup>3</sup> ]
75	1	0,98
	2	1,01
	3	0,81
90	1	0,98
	2	1,08
	3	0,91
105	1	1,04
	2	0,94
	3	1,03

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Datos obtenidos de densidad, de las probetas de madera plástica de formulación 70 % plástico y 30 % residuos de aserrín**

TIEMPO [min]	MUESTRA	DENSIDAD [g/cm <sup>3</sup> ]
75	1	0,97
	2	0,73
	3	0,98
90	1	0,98
	2	1,05
	3	1,05
105	1	0,93
	2	0,79
	3	0,98

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Datos obtenidos de densidad, de las probetas de madera plástica de formulación 80 % plástico y 20 % residuos de aserrín**

TIEMPO [min]	MUESTRA	DENSIDAD [g/cm <sup>3</sup> ]
75	1	0,94
	2	0,75
	3	1,22
90	1	0,80
	2	0,96
	3	1,01
105	1	1,06
	2	1,41
	3	0,99

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Datos obtenidos de inflamabilidad, de las probetas de madera plástica de formulación 60 % plástico y 40 % residuos de aserrín**

TIEMPO [min]	MUESTRA	INFLAMABILIDAD [°C]
75	1	275
	2	281
	3	277
90	1	280
	2	276
	3	280
105	1	278
	2	282
	3	278

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Datos obtenidos de inflamabilidad, de las probetas de madera plástica de formulación 70 % plástico y 30 % residuos de aserrín**

TIEMPO [min]	MUESTRA	INFLAMABILIDAD [°C]
75	1	260
	2	267
	3	257
90	1	268
	2	264
	3	260
105	1	271
	2	276
	3	268

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Datos obtenidos de inflamabilidad, de las probetas de madera plástica de formulación 80 % plástico y 20 % residuos de aserrín**

TIEMPO [min]	MUESTRA	INFLAMABILIDAD [°C]
75	1	230
	2	238
	3	232
90	1	236
	2	234
	3	230
105	1	230
	2	232
	3	236

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Datos obtenidos de fuerza de ruptura, de las probetas de madera plástica de formulación 60 % plástico y 40 % residuos de aserrín**

TIEMPO [min]	MUESTRA	FUERZA [N]
75	1	255,06
	2	235,44
	3	255,06
90	1	274,68
	2	215,82
	3	215,82
105	1	274,68
	2	294,3
	3	255,06

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Datos obtenidos de fuerza de ruptura, de las probetas de madera plástica de formulación 70 % plástico y 30 % residuos de aserrín**

TIEMPO [min]	MUESTRA	FUERZA [N]
75	1	196,2
	2	215,82
	3	215,82
90	1	215,82
	2	196,2
	3	176,58
105	1	196,2
	2	176,58
	3	215,82

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Datos obtenidos de fuerza de ruptura, de las probetas de madera plástica de formulación 80 % plástico y 20 % residuos de aserrín**

TIEMPO [min]	MUESTRA	FUERZA [N]
75	1	156,96
	2	117,72
	3	137,34
90	1	137,34
	2	176,58
	3	137,34
105	1	117,72
	2	117,72
	3	137,34

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Datos obtenidos de dureza, en las probetas de madera plástica de formulación 60 % plástico y 40 % residuos de aserrín**

TIEMPO: 75 min		TIEMPO: 90 min		TIEMPO: 105 min	
FUERZA [psi]	DESGASTE [mm]	FUERZA [psi]	DESGASTE [mm]	FUERZA [psi]	DESGASTE [mm]
300	10,01	300	11,01	300	11,01
600	8,51	600	10,01	600	10,51
900	7,01	900	9,51	900	10,01
-	-	1200	9,01	1200	9,51
-	-	1500	8,51	-	-

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Datos obtenidos de dureza, en las probetas de madera plástica de formulación 70 % plástico y 30 % residuos de aserrín**

TIEMPO: 75 min		TIEMPO: 90 min		TIEMPO: 105 min	
FUERZA [psi]	DESGASTE [mm]	FUERZA [psi]	DESGASTE [mm]	FUERZA [psi]	DESGASTE [mm]
300	10,01	300	10,01	300	9,51
600	9,51	600	10,01	-	-
900	9,01	900	9,51	-	-

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. **Datos obtenidos de dureza, en las probetas de madera plástica de formulación 80 % plástico y 20 % residuos de aserrín**

TIEMPO: 75 min		TIEMPO: 90 min		TIEMPO: 105 min	
FUERZA [psi]	DESGASTE [mm]	FUERZA [psi]	DESGASTE [mm]	FUERZA [psi]	DESGASTE [mm]
300	9,51	300	9,51	300	10,01
-	-	600	8,01	600	9,01

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **Datos obtenidos del porcentaje de humedad, de las probetas de madera plástica de formulación 60% plástico y 40% residuos de aserrín**

TIEMPO [min]	HUMEDAD/SECO [%R]	MATERIA SECA [%D]	HUMEDAD [%M]
75	2,481	95,579	2,42
90	1,896	98,14	1,86
105	1,091	98,91	1,079

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **Datos obtenidos del porcentaje de humedad, de las probetas de madera plástica de formulación 70 % plástico y 30 % residuos de aserrín**

TIEMPO [min]	HUMEDAD/SECO [%R]	MATERIA SECA [%D]	HUMEDAD [%M]
75	2,19	97,856	2,144
90	1,929	98,07	1,11
105	0,991	99,19	0,981

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **Datos obtenidos del porcentaje de humedad, de las probetas de madera plástica de formulación 80 % plástico y 20 % residuos de aserrín**

TIEMPO [min]	HUMEDAD/SECO [%R]	MATERIA SECA [%D]	HUMEDAD [%M]
75	2,229	97,82	2,18
90	1,793	98,239	1,761
105	1,12	98,892	1,108

Fuente: elaboración propia.

### 3.8. Análisis estadístico

Se desarrolló un análisis de varianza (Anova); para determinar cuán dispersos son los resultados y cuantificar si existe variación de las propiedades de la madera plástica al cambiar la formulación de materia prima y el tiempo de residencia en el horno.

Se realizó un análisis con un nivel de significancia de 0,05 para un estudio, donde se trabajó a temperatura y presión de compresión constante, para tres variables de formulación y tres variables de tiempo de residencia en hornos, por lo que se obtiene un experimento factorial del tipo  $3^2$ .

Tabla XXXII. **Análisis de varianza para el experimento de 2 factores con  $n$  número de replicas**

	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.

De esta manera, se obtuvo el análisis para determinar si los experimentos realizados tienen variación significativa entre sí.

Tabla XXXIII. **Factores de contraste obtenidos para el experimento de 2 factores con  $n$  número de replicas**

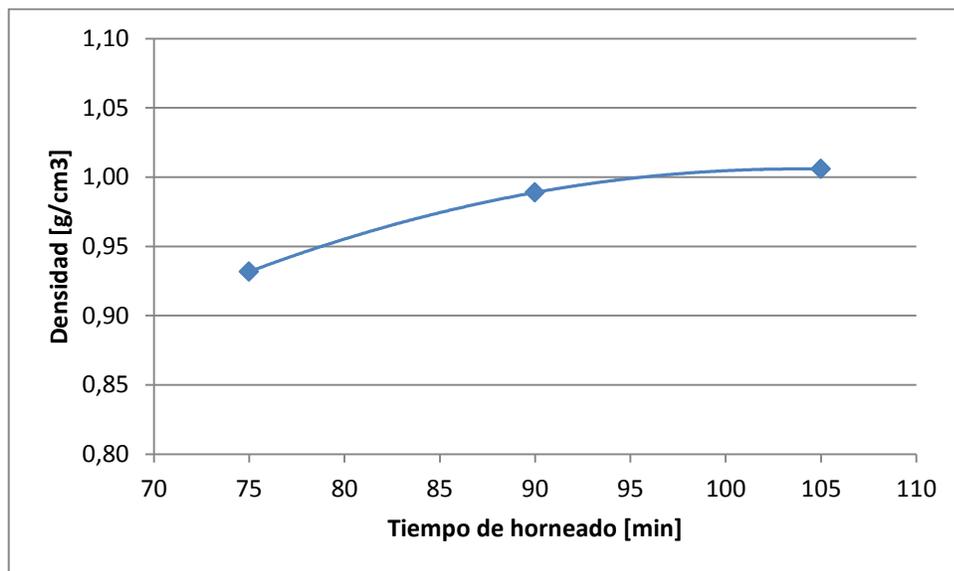
	Factor de contraste		
	Real	Teórico	
Densidad	F1	0,063	3,55
	F2	0,04	3,55
	F3	0,089	2,93
Ruptura	F1	0,143	3,55
	F2	75,454	2,93
	F3	2,286	2,93
Inflamabilidad	F1	2,625	3,55
	F2	387,48	2,93
	F3	2,176	2,93

Fuente: elaboración propia.

## 4. RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados en las figuras de la 1 a la 9.

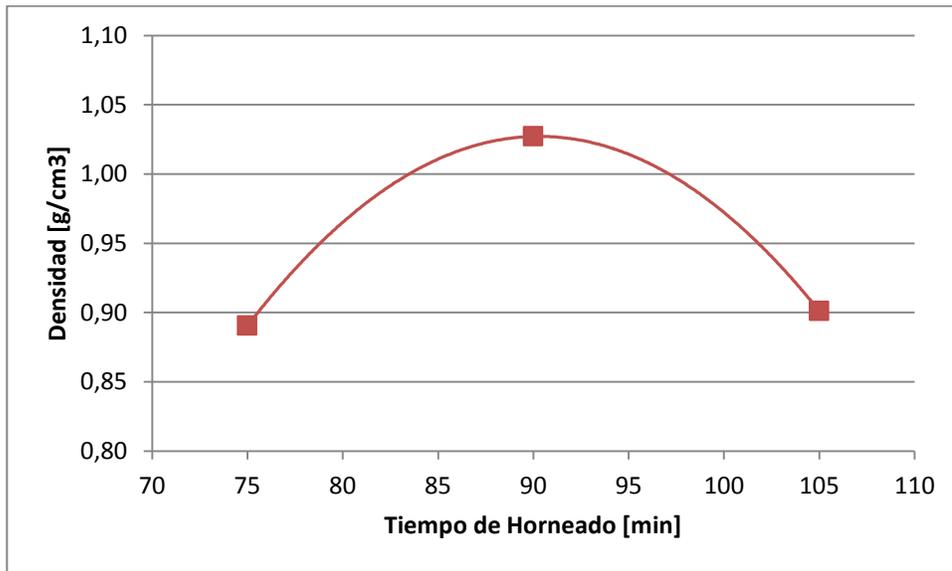
Figura 1. **Densidad de formulación 60 % PET – 40 % residuos de aserrín, en función del tiempo de residencia en el horno**



FORMULACIÓN	ECUACIÓN DE REGRESIÓN	CORRELACIÓN
60-40	$\rho = -9E-0,5t^2 + 0,0186t + 0,0399$	1

Fuente: elaboración propia.

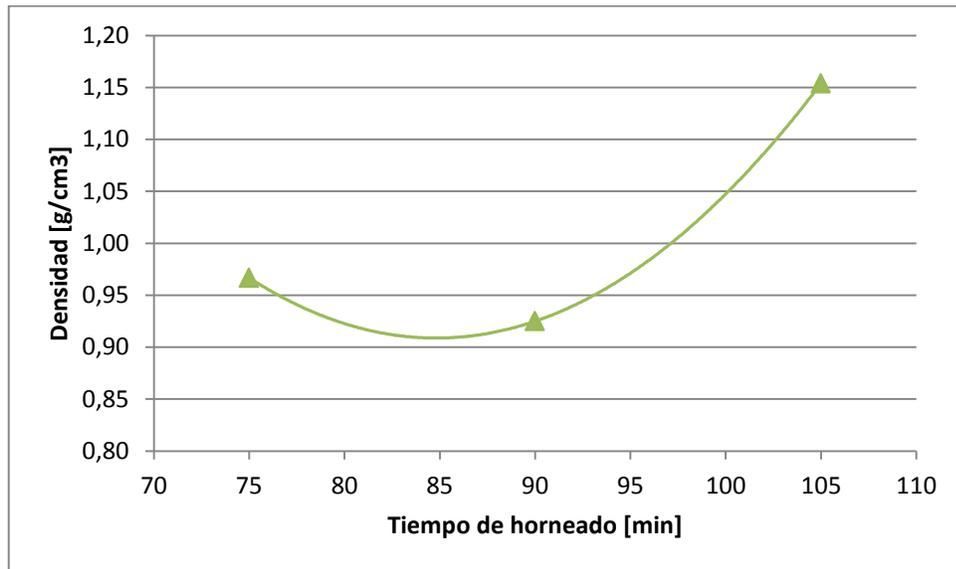
Figura 2. **Densidad de formulación 70 % PET – 30 % residuos de aserrín, en función del tiempo de residencia en el horno**



FORMULACIÓN	DENSIDAD [gm/cm3]	ECUACIÓN DE REGRESIÓN	CORRELACIÓN
70-30	0.94	$\rho = -0,0006t^2 + 0,1054t - 3,7327$	1

Fuente: elaboración propia.

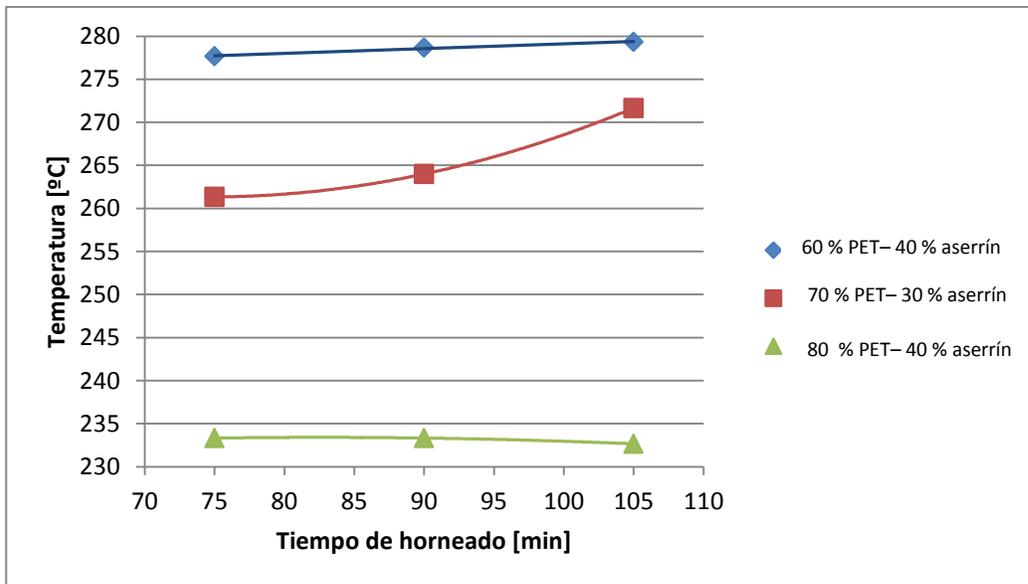
Figura 3. **Densidad de formulación 80 % PET – 20 % residuos de aserrín, en función del tiempo de residencia en el horno**



FORMULACIÓN	ECUACIÓN DE REGRESIÓN	CORRELACIÓN
80-20	$\rho = 0,0006t^2 - 0,102t + 5,2326$	1

Fuente: elaboración propia.

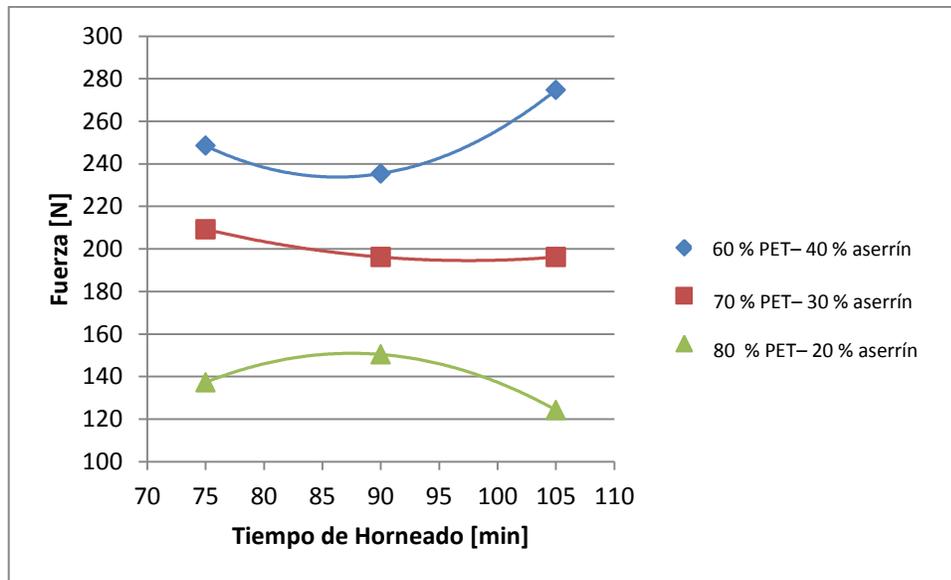
Figura 4. Temperatura de inflamación para cada una de las formulaciones de madera plástica, en función del tiempo de residencia en el horno



FORMULACIÓN	ECUACIÓN DE REGRESIÓN	CORRELACIÓN
60-40	$T = 0,0556t + 273,56$	0,9868
70-30	$T = 0,0111t^2 - 1,6556t + 323$	1
80-20	$T = -0,0015t^2 + 0,444t + 223,33$	1

Fuente: elaboración propia.

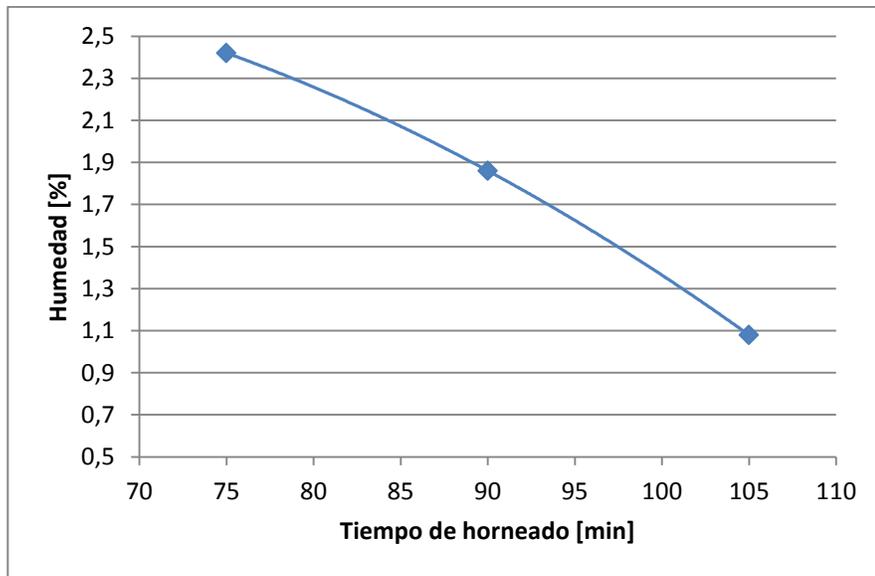
Figura 5. Fuerza de ruptura para cada una de las formulaciones de madera plástica, en función del tiempo de residencia en el horno



FORMULACIÓN	ECUACIÓN DE REGRESIÓN	CORRELACIÓ N
60-40	$F = 0,1163t^2 - 20,056t + 1098,7$	1
70-30	$F = 0,0291t^2 - 5,668t + 470,88$	1
80-20	$F = -0,0872t^2 + 15,26t - 516,66$	1

Fuente: elaboración propia.

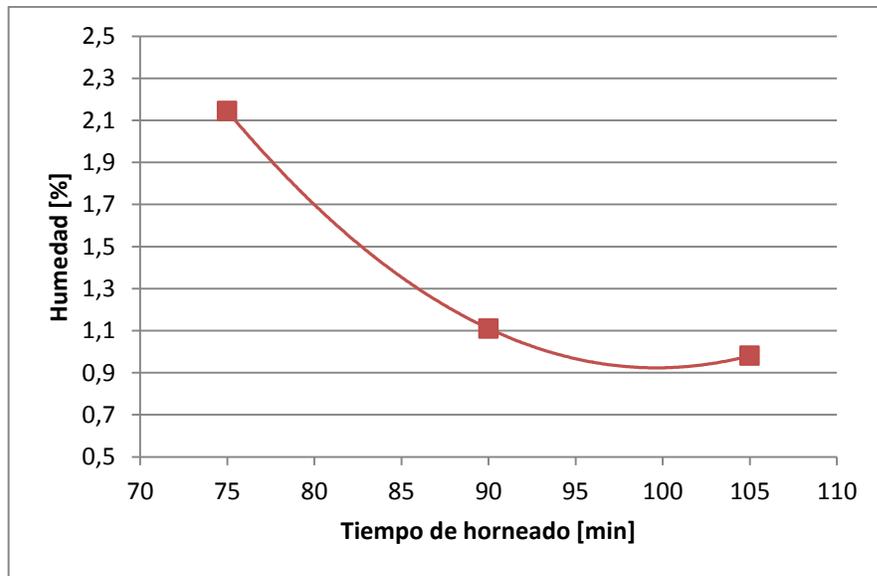
Figura 6. **Porcentaje de humedad de formulación 60 % PET – 40 % residuos de aserrín, en función del tiempo de residencia en el horno**



FORMULACIÓN	ECUACIÓN DE REGRESIÓN	CORRELACIÓ N
60-40	$\%H = -0,0005t^2 + 0,0437t + 1,905$	1

Fuente: elaboración propia.

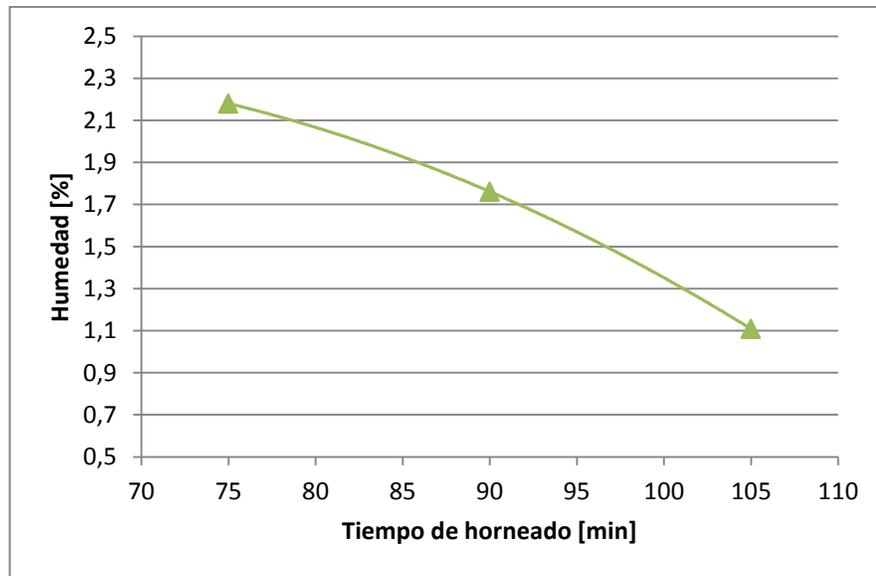
Figura 7. **Porcentaje de humedad de formulación 70 % PET – 30 % residuos de aserrín, en función del tiempo de residencia en el horno**



FORMULACIÓN	ECUACIÓN DE REGRESIÓN	CORRELACIÓN N
70-30	$\%H = 0,002t^2 - 0,4008t + 20,889$	1

Fuente: elaboración propia.

Figura 8. **Porcentaje de humedad de formulación 80 % PET – 20 % residuos de aserrín, en función del tiempo de residencia en el horno**



FORMULACIÓN	ECUACIÓN DE REGRESIÓN	CORRELACIÓN
80-20	$\%H = -0,0005t^2 + 0,0579t + 0,765$	1

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIV. **Dureza para cada una de las formulaciones de madera plástica con base en la prueba Janka**

	60 % plástico – 40 % aserrín	70 % plástico – 30 % aserrín	80 % plástico – 20 % aserrín
TIEMPO: 75 min	NO PASA	NO PASA	NO PASA
TIEMPO: 90 min	NO PASA	NO PASA	NO PASA
TIEMPO: 105 min	NO PASA	NO PASA	NO PASA

Fuente: elaboración propia.

## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Se elaboraron probetas de madera plástica a partir de mezclas de residuos de aserrín y PET reciclado, y se evaluaron sus propiedades fisicomecánicas para determinar la calidad de las probetas, en comparación con la madera pura.

Con base en pruebas preliminares, se determinó una temperatura de residencia en el horno de al menos 300 °C, para las mezclas de aserrín y PET reciclado. Esto se basa en que, la temperatura de fusión del PET es de 180 °C y, al combinarse con residuos de aserrín, este actúa como aislante en el momento que se funde la mezcla.

La presión de compresión se estableció de 10 toneladas ya que, a presiones mayores, el material fundido tiende a deslizarse por las fisuras del molde, lo que provoca pérdidas de material y, por consiguiente, probetas de madera plástica no homogéneas.

El tamaño de partícula utilizado se estableció con base en la facilidad de manipulación de las probetas, ya que, al ser la partícula de termoplástico uniforme, si la partícula de aserrín es demasiado fina, el material al fundir registra pérdidas al deslizarse en el molde de fabricación. Por el contrario, si la partícula es demasiado grande, al aumentar la temperatura se cristaliza impidiendo la aglomeración de la mezcla.

El estudio se realizó con tres formulaciones de proporciones diferentes de polietilentereftalato; 60, 70 y 80 % respectivamente, de esta forma se evaluó el efecto que causa el cambio en la proporción de aglutinante. Cada proporción se evaluó a tres tiempos de residencia en el horno, 75, 90 y 105 minutos, y se determinó el comportamiento de fusión de la mezcla con respecto al tiempo. Para cada evaluación, se realizaron tres repeticiones para el análisis de pruebas fisicomecánicas. En total, se elaboraron y analizaron 36 probetas de madera plástica.

El comportamiento de la densidad de las probetas elaboradas con las tres formulaciones estudiadas, en función del tiempo de residencia en el horno, se observa en las figuras 1, 2 y 3. La formulación con contenido de polímero del 80 % en principio disminuye su densidad al aumentar el tiempo de residencia en el horno, pero, cerca de los 85 minutos, la tendencia se invierte y la densidad empieza a aumentar. Esto refleja una contracción en el volumen de la probeta y un acomodamiento de las partículas del aserrín a medida que el polímero alcanza su punto de fluidez. El comportamiento es contrario para la formulación con 60 % y 70 % de polímero, ya que la densidad se incrementa uniformemente a medida que se aumenta el tiempo de residencia en el horno. Esto evidencia una dilatación uniforme, aunque en menor medida, del volumen de la probeta al incrementarse el tiempo de residencia en el horno.

A pesar del comportamiento de la densidad de las probetas para las tres formulaciones, el análisis estadístico no registra variación significativa respecto al tiempo de residencia en el horno, ya que esta es una propiedad que depende únicamente de las propiedades de la materia prima y la forma en que ambas se fusionan. La densidad resultante de las probetas oscila entre 0,89 y 1,15 g/cm<sup>3</sup>.

La temperatura de inflamación de a cada una de las formulaciones, representada en la figura 4, depende de la cantidad de plástico presente en la mezcla; es decir, las probetas con mayor cantidad de plástico tienen menor punto de inflamación. Esto se debe a que el plástico tiene un punto de ignición elevado, sin embargo, en ninguna de las formulaciones se obtuvo una llama estable de inflamación. Únicamente se originó una pequeña ignición, por lo que no se generó una reacción de combustión completa, dejando como residuos una mezcla viscosa que se solidificó con porosidades en su apariencia física. Con respecto al tiempo de residencia en el horno, no existió variación significativa que afecte la inflamabilidad de la mezcla.

En la prueba de ruptura (figura 5), se observó que a mayor cantidad de plástico, menor será la fuerza de ruptura que se requiere. Esto se debe a que el plástico al fundirse se cristaliza, ocasionando así mayor rigidez a la mezcla y, por consiguiente, una fuerza de ruptura mínima. Con respecto al tiempo de residencia en el horno, no se obtuvo un comportamiento específico, ya que esta propiedad se ve afectada por la homogeneidad de la mezcla; es decir, donde exista mayor acumulación de plástico será menor la fuerza que se requiera para lograr la ruptura.

Con respecto al porcentaje de humedad, graficado en las figuras 6, 7 y 8, se obtuvo que el porcentaje de humedad es proporcional a la cantidad de aserrín presente en la mezcla. Según el tiempo de residencia en el horno no existe un comportamiento específico, ya que esta propiedad se ve afectada por el equilibrio en las condiciones del entorno y la preparación de mezcla.

La prueba de dureza se realizó bajo los parámetros establecidos por la prueba Janka; la cual establece que se debe medir la fuerza que se requiere para insertar un balín a las probetas, hasta aproximadamente la mitad. Debido a

que el PET al fundir se cristaliza, no es posible insertar un balón hasta aproximadamente la mitad del mismo; por lo que, de acuerdo a la generalidad de la prueba, ninguna de las formulaciones pasa la prueba de Janka. El tiempo de residencia en el horno no influye en la formulación.

En cuanto a la dispersión de resultados para cada formulación fabricada (análisis de varianza), se determinó que no hay variación significativa de la densidad para cada una de las composiciones, ni para el tiempo de residencia en el horno de cada una. En cuanto a la fuerza de ruptura, hay variación entre cada una de las formulaciones realizadas, sin embargo, no hay variación significativa entre la fuerza de ruptura y el tiempo de horneado. Del grado de inflamabilidad, se determinó que no hay variación influyente del tiempo de horneado ni de la formulación para la composición aserrín-PET.

Se estableció que las probetas de madera plástica elaboradas con un 60 % de PET reciclado como aglomerante, de acuerdo a las propiedades fisicomecánicas evaluadas, es la proporción adecuada para la elaboración de madera plástica. Esto se basa en que la proporción de materiales es casi uniforme y, por lo tanto, la relación rigidez-flexibilidad también. Respecto al tiempo de horneado, el adecuado es 90 minutos, para garantizar la fusión de mezcla homogénea y optimizar el proceso de fabricación.

## CONCLUSIONES

1. La hipótesis científica planteada es aceptada, ya que es posible elaborar un tipo de madera plástica a base de residuos de aserrín y PET reciclado como aglutinante.
2. La hipótesis estadística es aceptada, ya que sí existe una variación significativa en las propiedades fisicomecánicas evaluadas para mezclas de residuos de aserrín y PET reciclado.
3. La formulación adecuada para la fabricación de madera plástica corresponde a un 60 % de PET reciclado y 40 % de residuos de aserrín, tamizados en partículas semejantes.
4. La densidad de mezcla de residuos de aserrín y PET reciclado depende de las propiedades de cada una de las materias primas y la forma como estas se fusionan.
5. El porcentaje de humedad en las probetas varía de acuerdo a las condiciones de equilibrio que se dan entre el entorno y las condiciones de trabajo.
6. El material compuesto obtenido no pasa la prueba Janka para ninguna de las formulaciones.

7. El tiempo de residencia en el horno adecuado para una aglomeración uniforme es de 90 minutos, a una temperatura de 300 °C y 10 toneladas de compresión.
8. El tiempo de prensado de mezcla adecuado es de 1 minuto, ya que el termoplástico al enfriar se solidifica rápidamente.
9. Se determinó con el análisis de varianza que el tiempo de residencia en el horno influye las pruebas realizadas, sin embargo, el porcentaje de termoplástico como aglomerante sí es factor influyente.

## RECOMENDACIONES

1. Trabajar a temperaturas de horneado de 300 °C en la elaboración de madera plástica con mezclas PET reciclado y aserrín, para asegurar que el termoplástico funda correctamente.
2. Trabajar tamaños de partícula de termoplástico y aserrín similares para garantizar la correcta aglomeración del material.
3. La proporción de termoplástico no debe exceder a la proporción de aserrín, para evitar que el material se cristalice y pierda flexibilidad.
4. Calentar el molde de las probetas junto con la mezcla de material para garantizar su compresión.
5. Precalentar el horno a la temperatura de trabajo deseada para optimizar el tiempo de fusión de mezcla.



## BIBLIOGRAFÍA

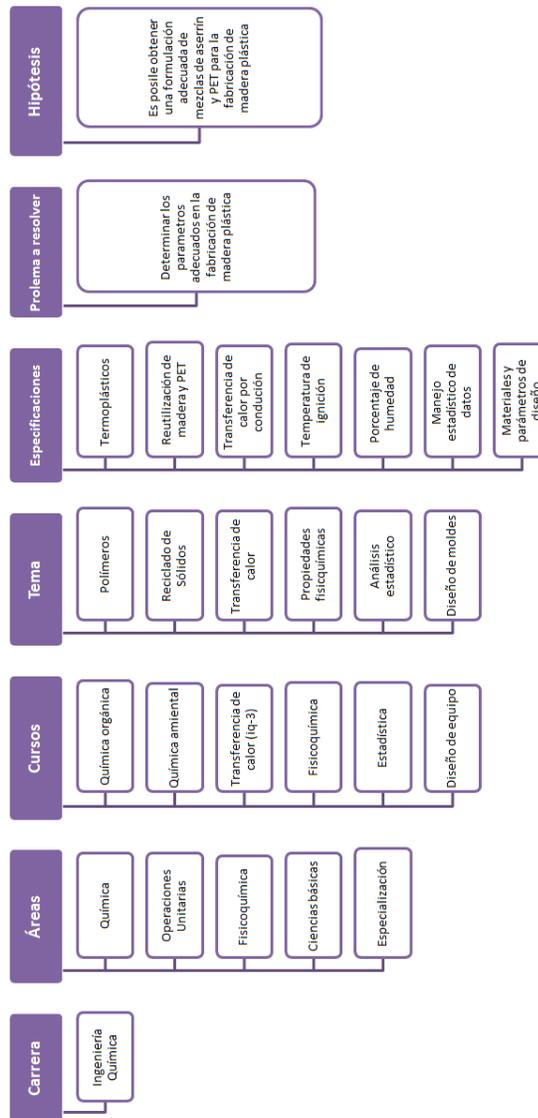
1. American Society for Testing and Materials, *Anual book ASTM standards 2000*. Estados Unidos: ASTM, 2000. 22 p.
2. GUERRA SALAZAR, María Eugenia. *Evaluación de los parámetros de operación adecuados para el procesamiento de la madera plástica, fabricada a partir de residuos de aserrín y polietileno de baja densidad de reciclado primario*. Trabajo de graduación de Ing. Químico. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2014. 129 p.
3. HARPER, Charles A. *Manual de plásticos*. México: McGraw-Hill Interamericana, 2004. 1 052 p.
4. McCABE WARREN, Julian C.; SMITH, Peter H. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. 7a. ed. México: McGraw-Hill, 2007. 1 211 p.
5. 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. 129 p.
6. 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.

7. ROGER M. RODWELL. *Handbook of wood chemistry and wood composites*. Estados Unidos: Taylor & Francis, 2005. 91 p.
8. SAMPIERI, Roberto; FERNÁNDEZ COLLADO, Carlos; BAPTISTA LUCIO, María el Pilar, *Metodología de la investigación*. 4a. ed. México: McGraw-Hill Interamericana, 2006. 139 p.
9. SOLDER BURILLO, Manuel. *Mil maderas II*. España: Universidad Politécnica de Valencia, 2004. 578 p.
10. WALPOLE, Ronald E.; MEYERS, Raymond H.; MEYERS, Sharon L. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. 6a. ed. México: PrenticeHall Hispanoamericana, 1999. 739 p.

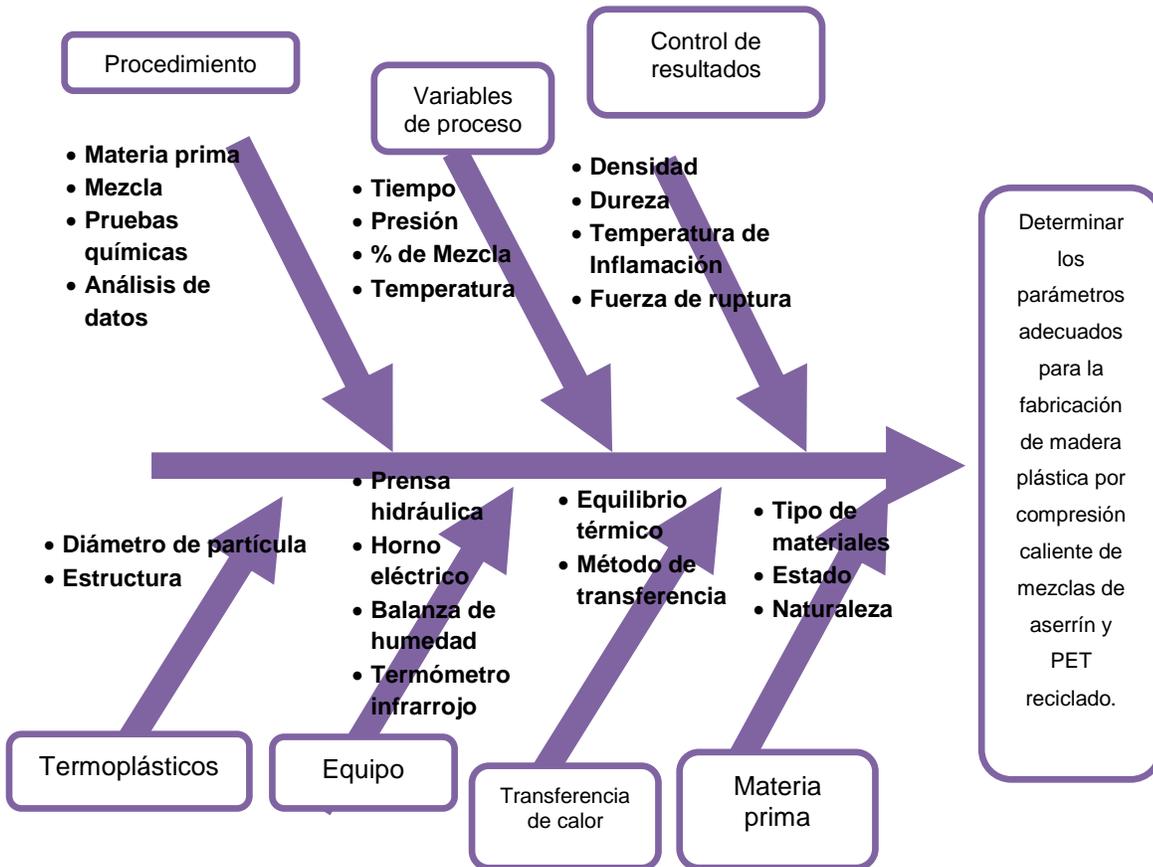
# APÉNDICES

## 1. Tabla de requisitos académicos



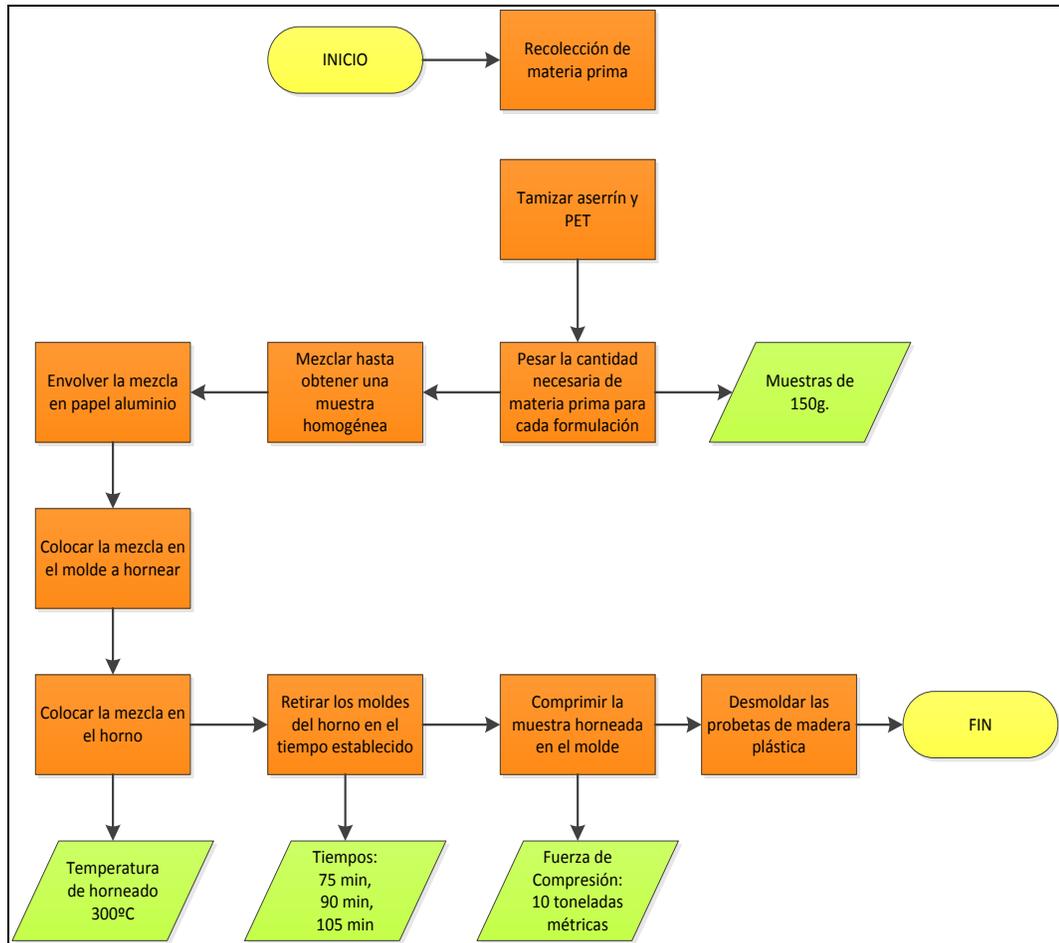
Fuente: elaboración propia.

## 2. Diagrama de Ishikawa



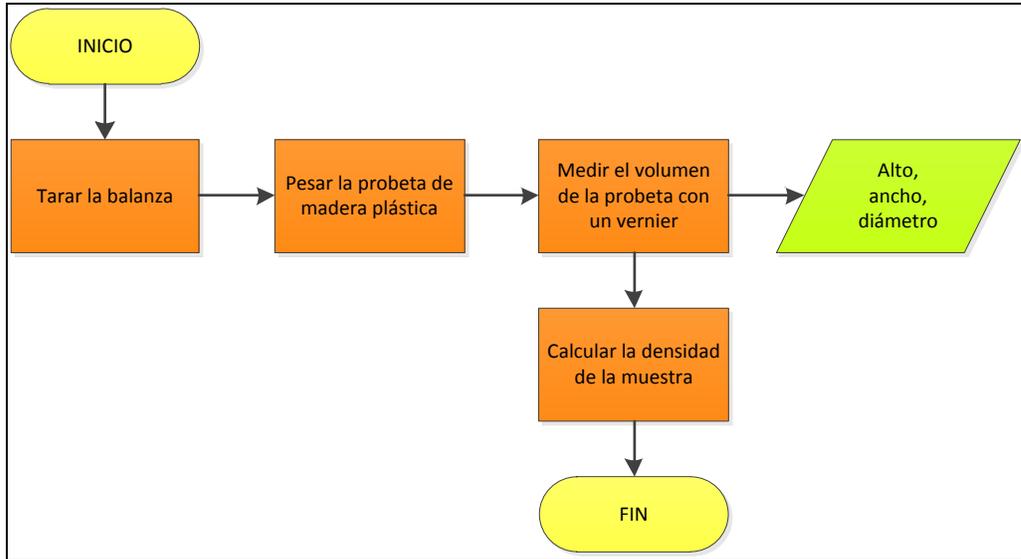
Fuente: elaboración propia.

### 3. Procedimiento de elaboración de madera plástica



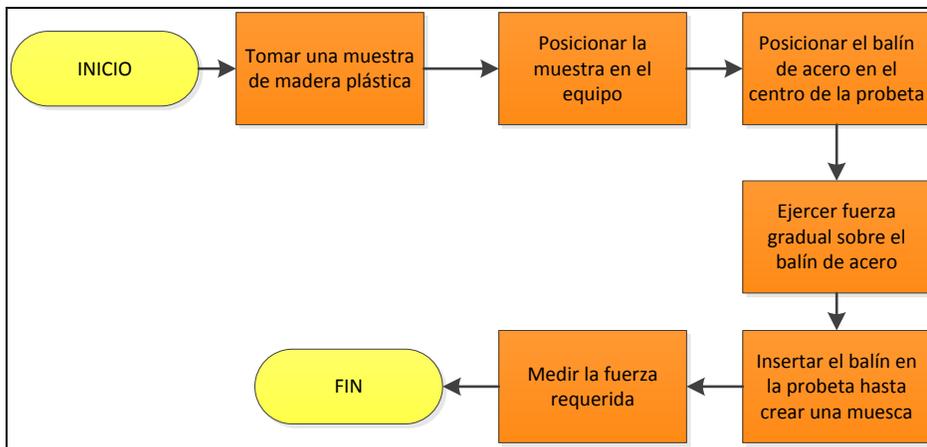
Fuente: elaboración propia.

#### 4. Procedimiento para evaluar la densidad de la probeta



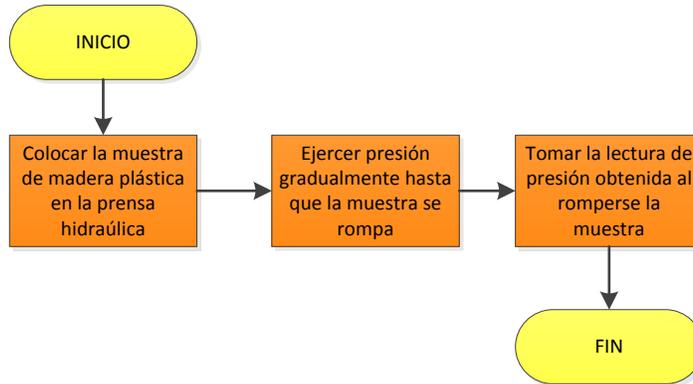
Fuente: elaboración propia.

#### 5. Procedimiento para evaluar dureza de la probeta



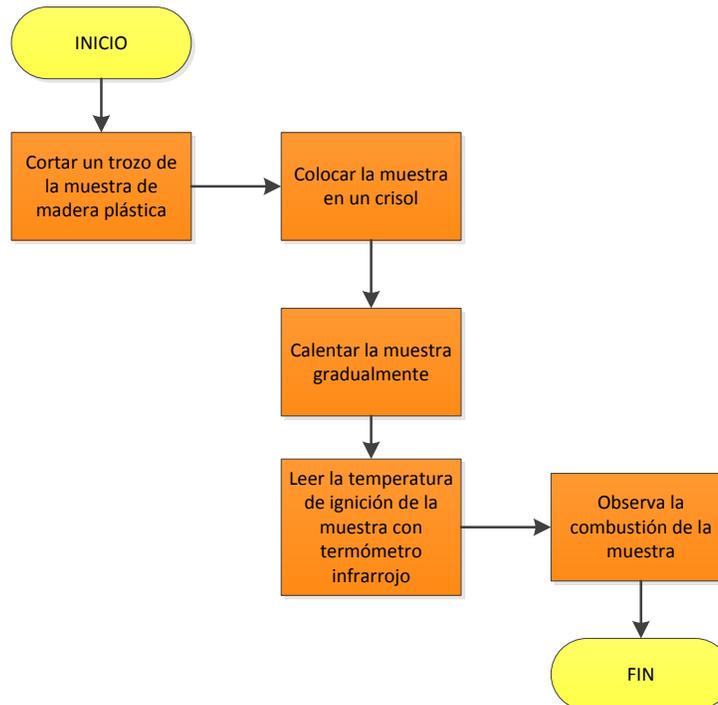
Fuente: elaboración propia.

## 6. Procedimiento para evaluar la fuerza de ruptura de la probeta



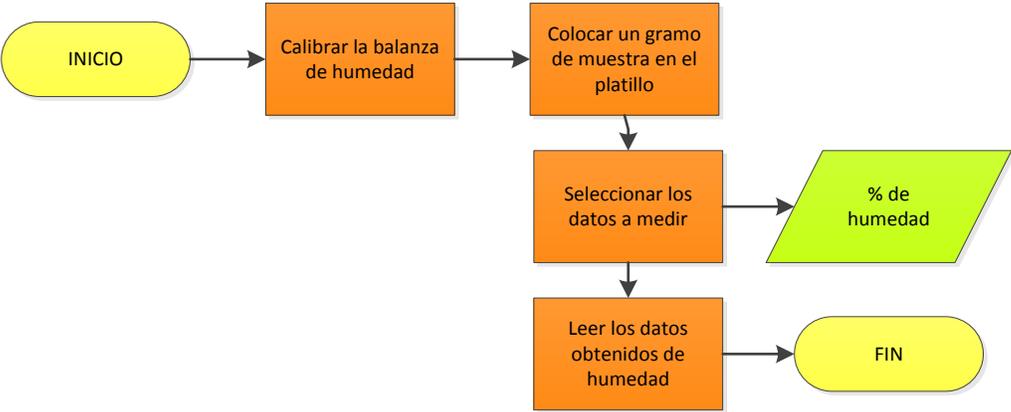
Fuente: elaboración propia.

## 7. Procedimiento para evaluar la temperatura de inflamación de la probeta



Fuente: elaboración propia.

**8. Procedimiento para evaluar el porcentaje de humedad de la probeta**



Fuente: elaboración propia

**9. Residuos de aserrín tamizado en los diferentes tamaños utilizados para la formulación de madera plástica**



Fuente: Laboratorio de Tecnología de la Madera, CII, USAC.

**10. Hojuelas de PET tamizado en los diferentes tamaños de partícula utilizados para la formulación de madera plástica**



Fuente: Laboratorio de Tecnología de la Madera, CII, USAC.

**11. Pesado de materia prima para la formulación de madera plástica**



Fuente: Laboratorio de Tecnología de la Madera, CII, USAC.

## 12. Proceso de horneado de las formulaciones de madera plástica



Fuente: Laboratorio de Tecnología de la Madera, CII, USAC.

## 13. Proceso de compresión de las formulaciones de madera plástica



Fuente: Laboratorio de Tecnología de la Madera, CII, USAC.

**14. Probetas terminadas de madera plástica a base de residuos de aserrín y PET reciclado**



Fuente: Laboratorio de Tecnología de la Madera, CII, USAC.

**15. Prueba de ruptura a probetas de madera plástica a base de residuos de aserrín y PET reciclado**



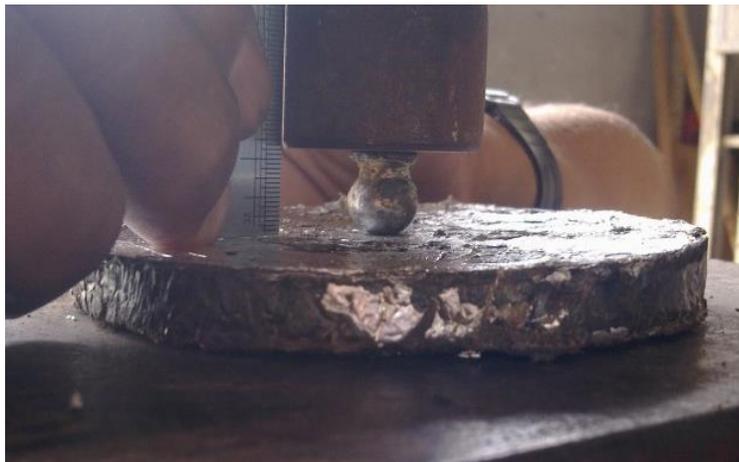
Fuente: Laboratorio de Tecnología de la Madera. CII. USAC

**16. Prueba de inflamabilidad a probetas de madera plástica a base de residuos de aserrín y PET reciclado**



Fuente: Laboratorio de Tecnología de la Madera, CII, USAC.

**17. Prueba de inflamabilidad a probetas de madera plástica a base de residuos de aserrín y PET reciclado**



Fuente: Laboratorio de Tecnología de la Madera, CII, USAC.