



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

**EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS ADECUADOS PARA LA ELABORACIÓN DE
MADERA PLÁSTICA POR COMPRESIÓN EN CALIENTE, A BASE DE ASERRÍN Y
POLÍMERO DE RECICLADO PRIMARIO, POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (*HDPE*)**

Julio César Arriola Zayas

Asesorado por el Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus

Guatemala, enero de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS ADECUADOS PARA LA ELABORACIÓN DE
MADERA PLÁSTICA POR COMPRESIÓN EN CALIENTE, A BASE DE ASERRÍN Y
POLÍMERO DE RECICLADO PRIMARIO, POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (HDPE)**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JULIO CÉSAR ARRIOLA ZAYAS

ASESORADO POR EL ING. JORGE EMILIO GODÍNEZ LEMUS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, ENERO DE 2016

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. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
EXAMINADOR	Ing. Manuel Gilberto Galván Estrada
EXAMINADOR	Ing. Erwin Manuel Ortiz Castillo
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 ADECUADOS PARA LA ELABORACIÓN DE MADERA PLÁSTICA POR COMPRESIÓN EN CALIENTE, A BASE DE ASERRÍN Y POLÍMERO DE RECICLADO PRIMARIO, POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (*HDPE*)

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

Julio César Arriola Zayas

Guatemala 21 de Octubre de 2015

Ing. Víctor Manuel Monzón

Director

Escuela de Ingeniería Química

Estima Ingeniero Monzón:

Por medio de la presente me dirijo a usted deseando que sus actividades estén llenas de éxitos y al mismo para informarle que he revisado el informe final de graduación del estudiante Julio César Arriola Zayas quien se identifica con carnet número 2008 19220, y que lleva por título **"Evaluación de los parámetros adecuados para la elaboración de madera plástica por compresión en caliente, a base de aserrín y polímero de reciclado primario, polietileno de alta densidad (HDPE)"**, y que he encontrado totalmente satisfactorio

Sin otro asunto en particular, quedo de usted



Ing. Jorge Emilio Godínez

Asesor

Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
INGENIERO QUÍMICO
Colegiado 874



Guatemala, 11 de noviembre de 2015.
Ref. EIQ.TG-IF.080.2015.

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 **105-2013** 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 el estudiante universitario: **Julio César Arriola Zayas**.
Identificado con número de carné: **2008-19220**.
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

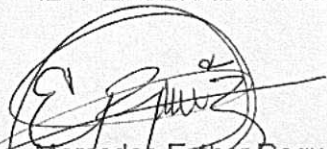
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS ADECUADOS PARA LA ELABORACIÓN DE MADERA PLÁSTICA POR COMPRESIÓN EN CALIENTE, A BASE DE ASERRÍN Y POLÍMERO DE RECICLADO PRIMARIO, POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (HDPE)

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.004.2016

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, **JULIO CÉSAR ARRIOLA ZAYAS** titulado: **"EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS ADECUADOS PARA LA ELABORACIÓN DE MADERA PLÁSTICA POR COMPRESIÓN EN CALIENTE, A BASE DE ASERRÍN Y POLÍMERO DE RECICLADO PRIMARIO, POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (HDPE)"**. 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. Carlos Salvador Wong Davi
Director
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, enero 2016

Cc: Archivo
CSWD/dle





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 PRÁMETROS ADECUADOS PARA LA ELABORACIÓN DE MADERA PLÁSTICA POR COMPRESIÓN EN CALIENTE, A BASE DE ASERRÍN Y POLÍMERO DE RECICLADO PRIMARIO, POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (HDPE)**, presentado por el estudiante universitario: **Julio César Arriola Zayas**, 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, enero 2016

/cc

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
Hipótesis	XVI
INTRODUCCIÓN	XVII
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Compuestos plásticos de madera (WPC).....	3
2.1.1. Composición de la madera plástica	4
2.1.2. Materiales plásticos	4
2.1.3. Material vegetal	5
2.1.4. Aditivos	5
2.2. Polímeros	6
2.2.1. Clasificación.....	7
2.2.1.1. Termoplásticos	8
2.2.1.2. Termoestables	8
2.2.2. Propiedades térmicas	9
2.2.3. Polietileno de alta densidad (HDPE).....	11
2.2.4. Estructura química del polietileno	12
2.2.4.1. Síntesis de polietileno	14

2.2.4.2.	Propiedades del polietileno de alta densidad (HDPE)	15
2.2.5.	Proceso de reciclaje de HDPE	18
2.2.6.	Aplicaciones	21
2.3.	Madera	21
2.3.1.	Celulosa	22
2.3.1.1.	Propiedades de la celulosa	23
2.4.	Interfase plásticomadera	24
2.5.	Proceso de producción.....	26
2.5.1.	Extrusión	26
2.5.2.	Inyección	26
2.5.3.	Moldeo por soplado.....	27
2.5.4.	Moldeo por compresión	27
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	29
3.1.	Variables	29
3.1.1.	Variables de control.....	29
3.1.2.	Variables dependientes y respuesta	30
3.1.3.	Variables independientes	30
3.1.4.	Variables de medición	31
3.2.	Delimitación de campo de estudio	32
3.3.	Recursos humanos disponibles	33
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	33
3.4.1.	Materia prima	33
3.4.2.	Equipo para la elaboración de probetas de madera plástica	33
3.4.3.	Equipo para la determinación de los parámetros comparativos a evaluar	34
3.5.	Técnica cuantitativa.....	34

3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	35
3.6.1.	Recolección de datos para elaboración de probetas.....	36
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	38
3.8.	Análisis estadístico	39
3.8.1.	Análisis de varianza.....	40
3.8.2.	Factores experimentales y respuesta	41
3.9.	Plan de análisis de resultados	43
3.9.1.	Programas a utilizar para análisis de datos	44
4.	RESULTADOS	45
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	61
	CONCLUSIONES	67
	RECOMENDACIONES.....	69
	BIBLIOGRAFÍA.....	71
	APÉNDICE.....	75

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Diferencia de estructura de los polímeros	7
2.	Relación del módulo de elástico de los polímeros y temperatura de calentamiento.....	10
3.	Polietileno lineal (PELBD)	13
4.	Polietileno ramificado (LDPE)	14
5.	Esquema de producción del reciclaje de plástico.....	19
6.	Proceso de reciclado de polietileno de alta densidad	20
7.	Unión mecánica formada cuando un polímero líquido moja una superficie sólida rugosa.....	25
8.	Prensa para moldeo por compresión	28
9.	Esquema de factores experimentales	42
10.	Densidad en función del tiempo de residencia en el horno, con formulación de 30 % de desechos de aserrín y 70 % de polietileno de alta densidad de reciclado primario.....	45
11.	Densidad en función del tiempo de residencia en el horno, con formulación de 40 % de desechos de aserrín y 60 % de polietileno de alta densidad de reciclado primario.....	46
12.	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 alta densidad de reciclado primario	47
13.	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 de alta densidad de reciclado primario	48
14.	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 alta densidad de reciclado primario.....	49
15.	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	50
16.	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 de alta densidad de reciclado primario	51
17.	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 de alta densidad de reciclado primario	52
18.	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 alta densidad de reciclado primario	53
19.	Dureza Janka a diferentes tiempos de residencia en el horno para probetas de madera plástica, con formulación de 30 % de residuos de aserrín y 70 % de polietileno de alta densidad de reciclado primario.....	54
20.	Dureza Janka a diferentes tiempos de residencia en el horno para probetas de madera plástica, con formulación de 40 % de residuos	

	de aserrín y 60 % de polietileno de alta densidad de reciclado primario	55
21.	Dureza Janka a diferentes tiempos de residencia en el horno para probetas de madera plástica, con formulación de 50 % de residuos de aserrín y 50 % de polietileno de alta densidad de reciclado primario	56
22.	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 de alta densidad de reciclado primario.....	57
23.	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 de alta densidad de reciclado primario.....	58
24.	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 de alta densidad de reciclado primario.....	59

TABLAS

I.	Clasificación de aditivos según su función	6
II.	Propiedades eléctricas	16
III.	Propiedades físicas	16
IV.	Propiedades mecánicas	17
V.	Propiedades térmicas.....	17
VI.	Propiedades químicas.....	18
VII.	Comparación de las propiedades del polietileno de alta densidad virgen y reciclado	20

VIII.	Propiedades mecánicas de algunas fibras naturales.....	24
IX.	Determinación de variables de control.....	29
X.	Determinación de las variables dependientes	30
XI.	Determinación de variables independientes	31
XII.	Determinación de las variables de medición a escala laboratorio	31
XIII.	Metodología de trabajo	34
XIV.	Probetas de composición de 90 % de aglutinante y 10 % de aserrín ...	36
XV.	Probetas de composición de 80 % de aglutinante y 20 % de aserrín ...	37
XVI.	Probetas de composición de 70 % de aglutinante y 30 % de aserrín ...	37
XVII.	Cálculo de la medio aritmética	38
XVIII.	Cálculo de la varianza.....	38
XIX.	Cálculo de la desviación estándar	39
XX.	Análisis de varianza para el experimento de dos factores con n réplicas	40
XXI.	Análisis metodológico para la obtención de los resultados.....	43

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
cm²	Centímetro cuadrado
cm³	Centímetro cúbico
WPC	Compuestos de madera plástica
ρ	Densidad
F	Fuerza
°C	Grados Celsius
J	Grados Janka
g	Gramos
kN	Kilo Newton
kPa	Kilo Pascales
kg	Kilogramos
MPa	Megapascales
m³	Metro cúbico
min	Minutos
N	Newton
#	Número
HDP	Polietileno de alta densidad
PEAD	Polietileno de alta densidad
%H	Porcentaje de humedad
%	Porcentaje
Psi	Presión en el sistema americano de ingeniería lbf/pulg ²
Tif	Temperatura de inflamación

t

Tiempo

x

GLOSARIO

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

Ortótropo	Material de dos o tres ejes ortogonales entre sí, de doble simetría rotacional.
Polietileno	Químicamente, el polímero más simple es uno de los plásticos más comunes. Esto debido a su bajo precio y simplicidad en su fabricación.
Polímero	Macromoléculas formadas por la unión de moléculas más pequeñas llamadas monómeros.
Reciclado primario	Conversión del desecho plástico en artículos con propiedades físicas y químicas idénticas a las del material original.
Resistencia a la ruptura	Esfuerzo nominal desarrollado en un material en el punto de ruptura.
Tamaño de partícula	Diámetro promedio de una partícula definida.
Tamiz	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

El presente estudio determinó los parámetros adecuados para la elaboración de madera plástica a base de residuos de madera (aserrín). Es utilizado como aglutinante polímero de reciclado primario polietileno de alta densidad (HDPE), se fabricaron probetas cilíndricas, de 1,27 centímetros de grosor y 10 centímetros de diámetro. Se realizaron tres distintas proporciones de formulación para evaluar los efectos del mismo, se elaboraron por medio de compresión en caliente, manteniendo una presión constante de 10 toneladas y temperatura de 190 °C constantes. Esto mientras que se vario la temperatura de residencia en el horno.

Posteriormente a la fabricación de las probetas se realizaron pruebas fisicomecánicas. Esto para determinar los parámetros de densidad, fuerza de ruptura, dureza Janka, temperatura de inflamación y contenido de humedad. Con los resultados obtenidos se representaron, de manera gráfica, el comportamiento de las propiedades fisicomecánicas del material compuesto de residuos de madera y polímero de reciclado primario de polietileno de alta densidad. Esto en función del tiempo de residencia en el horno y la composición de material utilizado.

En lo que respecta la densidad, fuerza a la ruptura, temperatura de inflamabilidad, presentaron un comportamiento directamente proporcional al tiempo de residencia del horno. Así también, el material presentó mejores propiedades fisicomecánicas respecto a la formulación con mayor proporción de polímero presente. Mientras que en las pruebas de dureza Janka presentó

mayor resistencia en la formulación con mayor proporción de residuos de madera y como mayor contenido de humedad.

OBJETIVOS

General

Evaluar los parámetros adecuados para la elaboración de madera plástica por compresión en caliente, a base de aserrín y polímero de reciclado primario, polietileno de alta densidad (*HDPE*).

Específicos

1. Evaluar la proporción adecuada del uso de polímero reciclado como aglutinante en aserrín de madera.
2. Estimar la temperatura de procesamiento adecuado que aglutina el plástico a la madera.
3. Determinar la incidencia del tiempo de residencia en el horno sobre las propiedades de la madera plástica.
4. Valorar la presión de prensado adecuada sobre las propiedades de la madera plástica.
5. Evaluar las propiedades físicas de la madera plástica con aglutinante polímero reciclado de polietileno de alta densidad.
6. Diagnosticar las propiedades mecánicas de la madera plástica con aglutinante polímero reciclado de polietileno de alta densidad.

7. Determinar las propiedades térmicas de la madera plástica con aglutinante polímero reciclado de polietileno de alta densidad.

Hipótesis

- Hipótesis científica: es posible elaborar madera plástica utilizando polietileno de alta densidad de reciclado primario como agente aglutinante para la fibra vegetal aserrín. Esto considerando los parámetros de proceso adecuados, tiempo de residencia en el horno, formulación, tiempo y presión de prensado, para evaluar la calidad de la madera.
- Hipótesis estadística
 - Hipótesis nula (H_0): no existe diferencias significativas en las propiedades de la madera plástica obtenida, variando la formulación, tiempo de residencia en el horno, temperatura y presión de prensado.

$$\mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$$

- Hipótesis alternativa (H_0): existe diferencias significativas en las propiedades de la madera plástica en la variación de porcentaje de mezcla; así como, el tiempo de residencia en el horno, temperatura y presión de compresión.

$$\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

INTRODUCCIÓN

Guatemala es un país de riqueza natural, con tierras ricas y primordialmente de características ampliamente forestales. Tomando en cuenta que se ha experimentado un proceso de cambios políticos, sociales y culturales. Además se ha visto un aumento en el consumo de productos naturales e industriales, se ha registrado un incremento descontrolado de los desechos sólidos que se generan en las urbes diariamente.

Los residuos plásticos y los de las industrias madereras de transformación secundaria forman parte de los residuos sólidos urbanos y el manejo inadecuado constituye uno de los mayores problemas ambientales. Esto por la cantidad de recursos que son necesarios para su disposición final en lugares apropiados.

La madera plástica no solo evita la tala de árboles, también la contaminación del medio ambiente. Esto al disponer de mejor manera los desechos plásticos al darles un nuevo uso.

La materia prima necesaria para elaborar madera plástica es considerada como un desecho maderero en el caso del aserrín y al plástico. Esto como un desecho altamente contaminante, cada uno de ellos considerados individualmente no tiene una función definida y al momento de utilizarla como alternativa. Para la elaboración de madera plástica se convierte en una opción de aprovechamiento, siendo más amigable al medioambiente.

La madera plástica, fabricada con residuos de madera y plástico reciclados, se han utilizado como alternativas competitivas. Además de ser no perjudiciales para el medioambiente, otro aspecto importante y que puede significar un aumento en el valor agregado del nuevo material radica en el aumento de su resistencia física mecánica.

1. ANTECEDENTES

En países extranjeros hay variedad de investigaciones realizadas sobre la madera plástica por mencionar algunos están Perú¹, Colombia², China³ y Alemania⁴. En algunos países lo han implementado de forma industrial, sin embargo en Guatemala no hay ningún estudio científico, donde se contemple al plástico como aglutinante en la elaboración de madera plástica utilizando como polímero polietileno de alta densidad.

Sin embargo, en febrero de 2014 se realizó la publicación del trabajo de graduación del ingeniero químico Mauricio Rivera Tello, en la Universidad de San Carlos de Guatemala, en el cual determinó los parámetros adecuados para la elaboración de madera plástica por compresión en caliente de mezclas de madera teca (*Tectona Grandis*) reducidos a aserrín y polipropileno.

Él utilizó tres proporciones de formulación de 40, 50 y 60 % en peso de polipropileno variando tres tiempo de residencia en horno de calentamiento 35, 45 y 55 minutos a 140, 160 y 180 °C de temperatura en el horno variando la presión de compresión 2, 4 y 6 toneladas. Esto para posteriormente realizarle pruebas fisicomecánicas, densidad, temperatura de inflamación, dureza en escala de Mohs y módulo de ruptura.

¹ LUCANA MASIAS, Dante. *Diseño de un molde para la fabricación de probetas de materiales compuestos de matriz plástica y refuerzos de fibras naturales mediante compresión térmica.* p. 87.

² RODRIGUEZ MARTINEZ, Camilo. *Plan de negocios para el diseño de artículos fabricados en madera plástica para la industria de la construcción.* p. 96.

³ YONGFENG LI. *Wood-Polymer Composites.* p. 58.

⁴ TAKEYASU KIKUCHI. *The Technology for Manufacturing Wood Filled Plastic with Superior Properties to Natural Wood, and the Market thereto.* p. 125.

En agosto de 2015 se realizó la publicación del trabajo de graduación de la ingeniera química María Eugenia Guerra Salazar, de la Universidad de San Carlos de Guatemala. En él se realizó la *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*. Utilizó tres proporciones de formulación de 70, 40 y 50 % en peso de polietileno de baja densidad variando tres tiempos de residencia en el horno de calentamiento de 55, 65 y 75 minutos. Esto mantiene una constante temperatura de 190 °C y una presión de compresión de 10 toneladas. También se evaluó la densidad, temperatura de inflamación, resistencia a la ruptura, grados Janka y humedad del material compuesto.

Basándose en los estudios realizados anteriormente, dichos resultados son positivos para el aprovechamiento de desechos. Esto como el mejoramiento de las propiedades fisicomecánicas del material compuesto. Se decidió ampliar la línea de investigación utilizando mezcla de desechos de aserrín con polietileno de alta densidad de reciclado primario y evaluar las incidencias del material compuesto sobre sus propiedades fisicomecánicas.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Compuestos plásticos de madera (WPC)

Estos materiales están constituidos principalmente por materiales celulósicos y materiales termoplásticos. Los mismos suelen ser procesados mediante técnicas de transformación de polímeros.

Un polímero reforzado con fibra natural es un material compuesto que está conformado por un molde de plástico y fibras naturales de alta resistencia. El empleo de estos componentes no aportan ningún valor agregado, y al utilizarlos, como alternativa para la elaboración de materia plástica, está al alcance de una forma económica. Además de ser amigable al medioambiente.

En función del uso final, se encuentran dos compuestos de madera plástica:

- Plastic Lumber: madera 100 % de plástico reciclado obtenida del reciclaje de HDPE (polietileno de alta densidad) y otros materiales termoplásticos.
- Wood Plastic Composite (WPC): combinación de restos de madera y plásticos 100 % reciclados. Su vida útil es mayor que los productos de madera natural, ya que combina las calidades y apariencia de la madera con las ventajas de durabilidad y resistencia del plástico.

2.1.1. Composición de la madera plástica

El propósito de los materiales compuestos es el de mejorar y optimizar el empleo de los materiales tradicionales. Además, lograr una reducción de su peso y costo y mejorando sus propiedades físicas y mecánicas. En este material destacan una o más propiedades características de las fases constituyentes, de tal forma que las propiedades del conjunto resulten las mejores posibles.

El material compuesto está formado por dos fases: la matriz que es continua y que rodea a la otra fase que se denomina dispersa. Las propiedades resultantes dependen de las proporciones de las fases que lo constituyen, de sus proporciones relativas y de la naturaleza geométrica de la fase dispersa.

Las fibras de refuerzo o fase dispersa en una matriz polimérica, tienen como objetivo soportar. Esto tanto como sea posible, el esfuerzo aplicado al conjunto. Mientras que a la matriz polimérica le corresponde transmitir de forma efectiva las necesidades al esfuerzo.

2.1.2. Materiales plásticos

La composición plástica de la madera une las fibras, actuando como un medio que distribuye y transmite a las fibras los esfuerzos externos. La composición de plástico separa las fibras y, debido a su blandura y plasticidad, esta impide el agrietamiento de una fibra a otra. Con ello se evita la propagación del agrietamiento dando confiabilidad de estabilidad a la estructura.

2.1.3. Material vegetal

Este es heterogéneo, se ve reflejado por la variabilidad que es posible encontrar en probetas extraídas de una misma especie maderera y de diferentes árboles. Aun así, de la misma especie, estos son marcados en gran diferencia por su densidad y resistencia. Esto varía respecto a las diferencias genéticas, el ambiente y ambas.

Al elaborar madera plástica debe contenerla en un porcentaje de 50 % o hasta el 80 %. Para la cual se debe considerar como una harina fina al pasar por un tamiz de 0,60 mm. (#30 Serie Tyler) y se considera como una harina gruesa al pasara por un tamiz de 1,20 mm. (#16 Serie Tyler). El material vegetal, que debe ser inferior a los 5 mm, su objetivo es el armado, dando cuerpo a la estructura.

2.1.4. Aditivos

Son aquellos materiales que van dispersos físicamente en una matriz polimérica, sin afectar a su estructura molecular. Por tanto, quedan excluidas sustancias tales como catalizadores, reticulantes, etcétera.

Los aditivos se clasifican según su función y no en relación con su constitución química.

Tabla I. **Clasificación de aditivos según su función**

Función del aditivo	Tipo de aditivo
Aditivos que facilitan el procesado.	Estabilizantes Lubricantes
Aditivos que modifican las propiedades mecánicas.	Plastificantes Cargas reforzantes Modificadores de impacto
Aditivos que disminuyen costos de las formulaciones.	Cargas Diluyentes y extendedores
Modificadores de impacto.	Agentes antiestáticos Aditivos antideslizamiento Aditivos antidesgaste Promotores de adhesión
Modificadores de propiedades Ópticas.	Pigmentos y colorantes Agentes de nucleación
Aditivos contra el envejecimiento.	Estabilizantes contra luz UV Fungicidas
Otros.	Agentes espumantes Retardantes de llama

Fuente: LUCANA, Masías; DANTE, Ítalo. *Diseño de un molde para la fabricación de probetas de materiales compuestos de matriz plástica y refuerzos de fibras naturales mediante compresión térmica*. Tesis. Facultad de Ciencias e Ingeniería. Pontificia Universidad Católica del Perú, Mayo 2008. p. 135.

La concentración de los aditivos, en las formulaciones de plásticos, generalmente se expresa en peso referida a 100 gramos de polímero o phr (partes por 100 de resina).

2.2. Polímeros

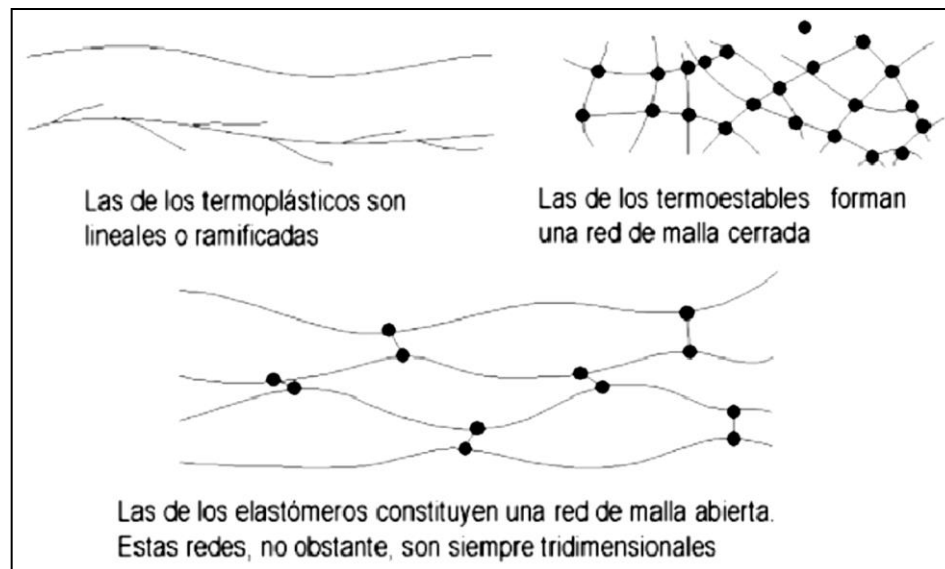
Estos se producen por la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas denominadas monómeros. Ellos constituyen enormes cadenas de las formas más diversas

2.2.1. Clasificación

Según sus propiedades térmicas y propiedades de estructura que forma sus cadenas macromoleculares, se pueden clasificar en tres grupos:

- Termoplásticos
- Termoestables
- Elastómeros

Figura 1. Diferencia de estructura de los polímeros



Fuente: LUCANA, Masías; DANTE, Ítalo. *Diseño de un molde para la fabricación de probetas de materiales compuestos de matriz plástica y refuerzos de fibras naturales mediante compresión térmica*. Tesis. Facultad de Ciencias e Ingeniería. Pontificia Universidad Católica del Perú, Mayo 2008. p. 151.

2.2.1.1. Termoplásticos

En muchas de las reacciones de polimerización, las unidades estructurales se colocan en forma de una cadena totalmente lineal. Tal es el caso de polímeros como el polietileno, polipropileno, policloruro de vinilo o poliestireno. Los polímeros de estas características topológicas son materiales termoplásticos. Ellos reblandecen o funden por acción del calor, dándoles forma mediante moldes, que posteriormente se estabiliza al enfriarlos, fabricando así multitud de objetos útiles.

Los polímeros termoplásticos son reciclados físicamente. Para ello, son recolectados, lavados y molidos. Una vez molidos se les calienta para ser fundidos, tras sobrepasar la más alta de sus transiciones térmicas, y darles la forma que se desea para su nueva aplicación. Este proceso es relativamente sencillo, pero no puede aplicarse a todos los plásticos ni realizarse numerosas veces. Estos plásticos reciclados son de menor calidad que un material nuevo o material virgen.

Cada vez que el material es reciclado, sufre un proceso de degradación con lo cual disminuyen sus propiedades

2.2.1.2. Termoestables

Este incluye uno o dos componentes que, en las condiciones de uso, son susceptibles de sufrir un proceso químico conocido como curado. En él se genera una nueva estructura de carácter tridimensional que hace que el producto presente una alta resistencia térmica, rigidez, estabilidad dimensional, resistencia a disolventes, y otros, que no tenía el compuesto de partida. Esas

reacciones de reticulación hacen también que el producto curado no sea susceptible de utilización posterior mediante reprocesado

2.2.2. Propiedades térmicas

Los termoplásticos en estado sólido pueden representarse como amorfos y cristalinos. Estructuralmente, un sólido polimérico en estado amorfo puede verse como un conjunto de cadenas entremezcladas al azar, carentes de orden. Esto mientras que un polímero en estado cristalino tiene las cadenas orientadas en direcciones preferentes o colocadas, en definitiva, ordenadas de alguna forma.

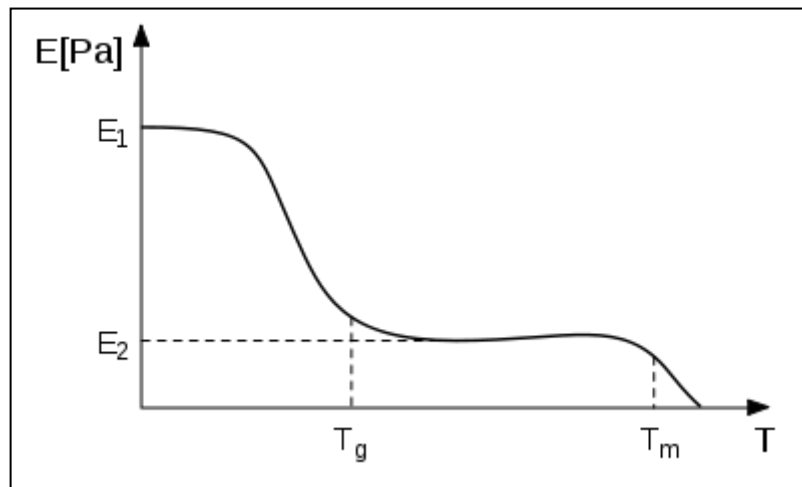
En los polímeros amorfos, el cambio más importante en sus propiedades ocurre en la denominada temperatura de transición vítrea (T_g). Por debajo de esta temperatura los movimientos de los segmentos de la cadena están prácticamente solidificados. Mientras al llegar a dicha temperatura, comienzan los movimientos moleculares de largo alcance, es decir, de un número amplio de segmentos de cadena, teniendo una gran influencia en las propiedades del material y en sus aplicaciones.

Por encima de esta región de temperaturas, el polímero es blando; este se comporta como un líquido más o menos viscoso con propiedades elásticas semejantes a las de los cauchos. Mientras que por debajo de ella el polímero es duro, rígido y quebradizo con propiedades análogas a los vidrios.

Por otro lado, al incrementar la temperatura y acercarse a la temperatura de fusión, (T_m) y mayores, las cadenas poliméricas se deslizan y separan causando un flujo viscoso irreversible. El material se comporta como un líquido muy viscoso. Los cambios físicos que sufre el polímero por efecto de la

temperatura se traducen, para efectos mecánicos, en una variación considerable del módulo de elasticidad (E).

Figura 2. **Relación del módulo de elástico de los polímeros y temperatura de calentamiento**



Fuente: LUCANA, Masías; DANTE, Ítalo. *Diseño de un molde para la fabricación de probetas de materiales compuestos de matriz plástica y refuerzos de fibras naturales mediante compresión térmica*. Tesis. Facultad de Ciencias e Ingeniería. Pontificia Universidad Católica del Perú, Mayo 2008. p. 135.

En este caso se está evaluando el termoplástico de polietileno de alta densidad reciclado. Por lo tanto, se debe saber la transición vítrea (T_g) y temperatura de fusión (T_m), siendo estas respectivamente de $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $137\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.2.3. Polietileno de alta densidad (HDPE)

Es un polímero obtenido del etileno en cadenas con moléculas bastantes juntas. Es un plástico incoloro, inodoro, no tóxico, fuerte y resistente a golpes y productos químicos. Su temperatura de ablandamiento es de 120 °C.

- Ventajas
 - Pérdidas de carga por fricción mínimas.
 - No es atacada en ninguna forma por la corrosión.
 - Ausencia de sedimentos e incrustaciones en su interior.
 - Flexibilidad.
 - Elasticidad.
 - No mantiene deformaciones permanentes.
 - Peso reducido.
 - Longitudes mayores reduciendo el número de uniones (menor costo) y reduce las posibilidades de fallas humanas en la instalación.
 - Fácil de transportar.
 - Larga vida útil.
 - Menor costo de adquisición e instalación.
 - Resistente a movimientos sísmicos.
 - Resistencia mecánica y ductilidad.
 - Resistente a bacterias y químicos.
 - El polietileno tiene también entre sus ventajas que es un producto reciclable. Esto significa que puede ser utilizado por terceros para fabricar por ejemplo estibas plásticas, sillas ornamentales, macetas plásticas, y otros.

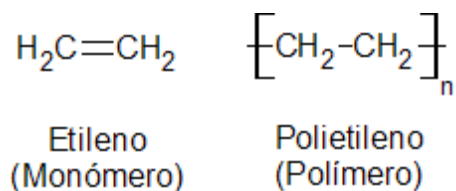
- Aplicaciones

En la industria actual, más de la mitad de su uso es para la fabricación de recipientes, tapas y cierres. Otro gran volumen se moldea para utensilios domésticos y juguetes; un uso también importante que tiene es para tuberías y conductos. Su uso para empaquetar se ha incrementado debido a su bajo costo, flexibilidad, durabilidad, su capacidad para resistir el proceso de esterilización, y resistencia a muchas sustancias químicas.

Entre otros muchos productos utilizados por el *HDPE*, nombran botes de aceite lubricante (automoción) y para disolventes orgánicos, mangos de cutter, depósitos de gasolina, botellas de leche, bolsas de plástico y juguetes. Para la fabricación de artículos huecos, como botellas, se usa un procedimiento parecido al de soplado del vidrio. Se usan también el moldeo por compresión y la conformación de láminas previamente formadas.

2.2.4. Estructura química del polietileno

Por la polimerización de etileno pueden obtenerse productos con propiedades físicas muy variadas. Estos productos tienen en común la estructura química fundamental $(-\text{CH}_2-\text{CH}_2-)_n$, y en general tienen propiedades químicas de un alcano de peso molecular elevado.



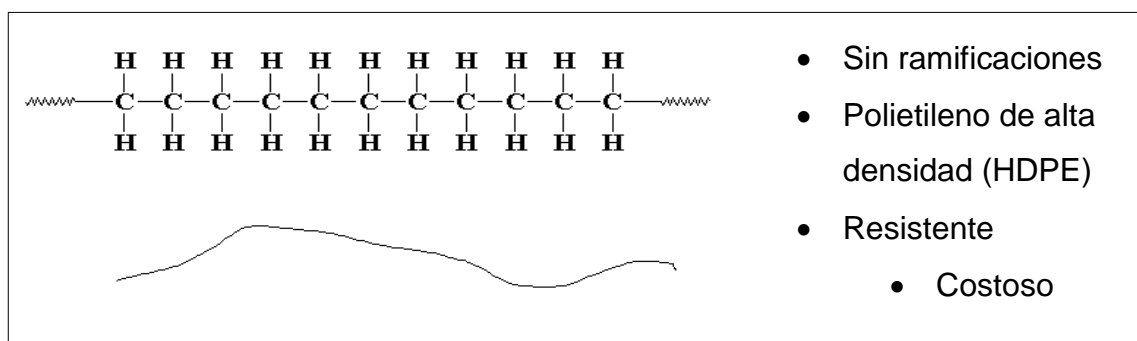
- Configuración en zig-zag

- Enlace covalente simple C-C, con ángulo 109°
- Cristalino/no cristalino
- Celdilla unidad ortorrómbica

El análisis del polietileno (C, 85,7 %; H, 14,3 %) corresponde a la fórmula empírica $(CH_2)_n$, resultante de la polimerización por adición del etileno. La estructura de un polietileno típico difiere de la de un alcano de cadena recta en que es de cadena ramificada y contiene grupos olefínicos de tres tipos (por lo menos).

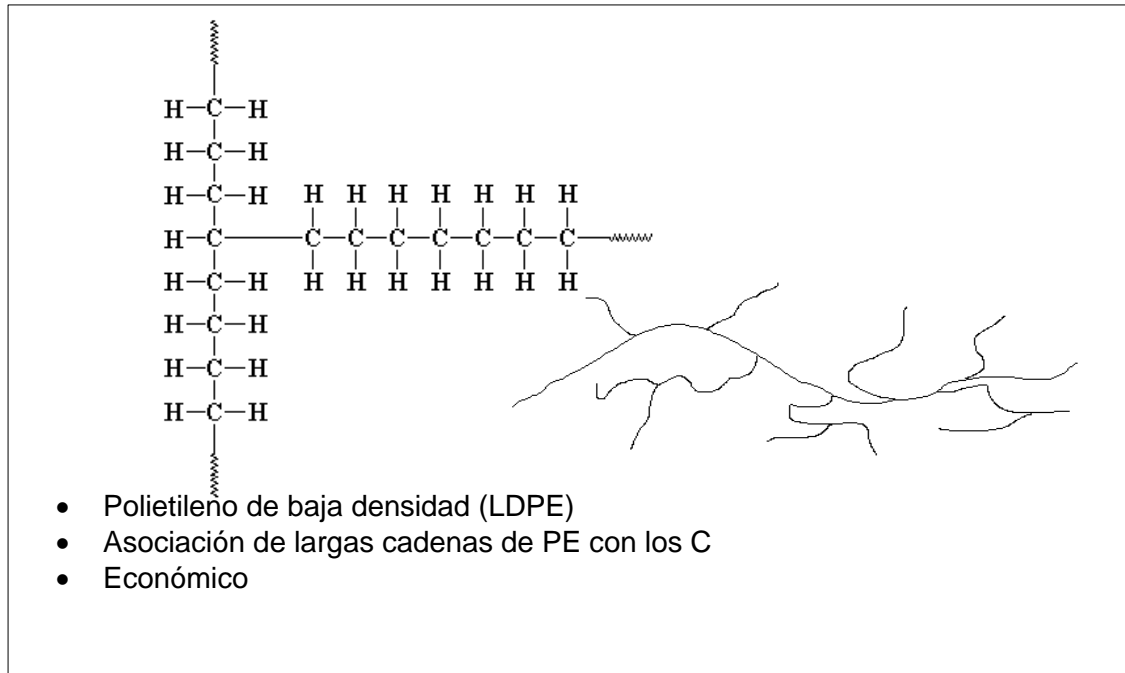
Puede contener también otros grupos químicos derivados del catalizador usado en su fabricación o de impurezas en el etileno, pero representan generalmente mucho menos de 0,1 % en peso del polímero. La condición ramificada de la cadena del polímero influye profundamente en las propiedades físicas, tanto del polietileno sólido como del polietileno fundido.

Figura 3. **Polietileno lineal (PELBD)**



Fuente: LUCANA, Masías; DANTE, Ítalo. *Diseño de un molde para la fabricación de probetas de materiales compuestos de matriz plástica y refuerzos de fibras naturales mediante compresión térmica*. Tesis. Facultad de Ciencias e Ingeniería. Pontificia Universidad Católica del Perú, Mayo 2008. p. 165.

Figura 4. **Polietileno Ramificado (LDPE)**



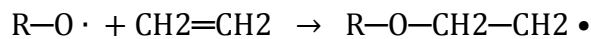
Fuente: LUCANA, Masías; DANTE, Ítalo. *Diseño de un molde para la fabricación de probetas de materiales compuestos de matriz plástica y refuerzos de fibras naturales mediante compresión térmica*. Tesis. Facultad de Ciencias e Ingeniería. Pontificia Universidad Católica del Perú, Mayo 2008. p. 176.

2.2.4.1. Síntesis de polietileno

Es uno de los plásticos más comunes debido a su bajo precio y simplicidad en su fabricación, lo que genera una producción de aproximadamente 60 millones de toneladas anuales alrededor del mundo.

- Polimerización por adición:
- Iniciación: $\text{H-O-O-H} \rightarrow 2\text{H-O}\cdot$

- Crecimiento: $R \cdot n + \text{monómero (CH}_2=\text{CH}_2) \rightarrow R \cdot n + 1$
- Terminación: $R_n + R_p \rightarrow P_n + p$
- Polimerización por adición:
- Iniciación: necesidad de radicales libres, como peróxidos orgánicos.

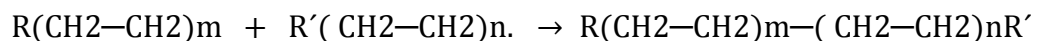


- Crecimiento:
 $R-CH_2-CH_2 \cdot + CH_2=CH_2 \rightarrow R-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2 \cdot$

Peso molecular medio en número

Peso molecular medio en peso

- Terminación: por adición de un radical libre o combinación de cadenas en crecimiento.



2.2.4.2. Propiedades del polietileno de alta densidad (HDPE)

El polietileno de alto peso molecular es un sólido blanco y translúcido. En secciones delgadas es casi del todo transparente. A las temperaturas ordinarias es tenaz y flexible, tiene una superficie relativamente blanda que puede rayarse con la uña. A medida que aumenta la temperatura, el sólido va haciéndose más blando y finalmente se funde a unos 110 °C, transformándose en un líquido

transparente. Si se reduce la temperatura por debajo de la normal, el sólido se hace más duro y más rígido, y se alcanza una temperatura a la cual una muestra no puede doblarse sin romperse.

Tabla II. **Propiedades eléctricas**

Constante dieléctrica a 1MHz	2,3-2,4
Factor de disipación a 1MHz	$1-10 \times 10^{-4}$
Resistencia dieléctrica (KV mm ⁻¹)	22
Resistencia superficial (ohm/sq)	10^{13}
Resistencia de volumen (ohm cm)	$10^{15}-10^{18}$

Fuente: ROCA GIRÓN, Iván. *Estudio de las propiedades y aplicaciones industriales del polietileno de alta densidad (PEAD)*. Trabajo de graduación. Facultad de Ingeniería, Ingeniería Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Septiembre 2005. p. 172.

Tabla III. **Propiedades físicas**

Absorción de agua en 24h (%)	< 0,01
Densidad (g/cm ³)	0,94-0,97
Índice refractivo	1,54
Resistencia a la radiación	Aceptable
Resistencia al ultra-violeta	Mala
Coefficiente de expansión lineal (K ⁻¹)	2×10^{-4}
Grado de cristalinidad (%)	60-80

Fuente: ROCA GIRÓN, Iván. *Estudio de las propiedades y aplicaciones industriales del polietileno de alta densidad (PEAD)*. Trabajo de graduación. Facultad de Ingeniería, Ingeniería Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Septiembre 2005. p. 181.

Tabla IV. **Propiedades mecánicas**

Módulo elástico E (N/mm ²)	1 000
Coefficiente de fricción	0,29
Módulo de tracción (GPa)	0,5-1,2
Relación de Poisson	0,46
Resistencia a tracción (MPa)	15-40
Esfuerzo de rotura (N/mm ²)	20-30
Elongación a ruptura (%)	12

Fuente; ROCA GIRÓN, Iván. *Estudio de las propiedades y aplicaciones industriales del polietileno de alta densidad (PEAD)*. Trabajo de graduación. Facultad de Ingeniería, Ingeniería Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Septiembre 2005. p. 193.

Tabla V. **Propiedades térmicas**

Calor específico (J K ⁻¹ Kg ⁻¹)	1 900
Coefficiente de expansión (x 10 ⁶ K ⁻¹)	100-200
Conductividad térmica a 23 °C (W/mK)	0,45-0,52
Temperatura máxima de utilización (°C)	55-120
Temperatura de reblandecimiento (°C)	140
Temperatura de cristalización (°C)	130-135

Fuente: ROCA GIRÓN, Iván. *Estudio de las propiedades y aplicaciones industriales del polietileno de alta densidad (PEAD)*. Trabajo de graduación. Facultad de Ingeniería, Ingeniería Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Septiembre 2005. p. 215.

Tabla VI. **Propiedades químicas**

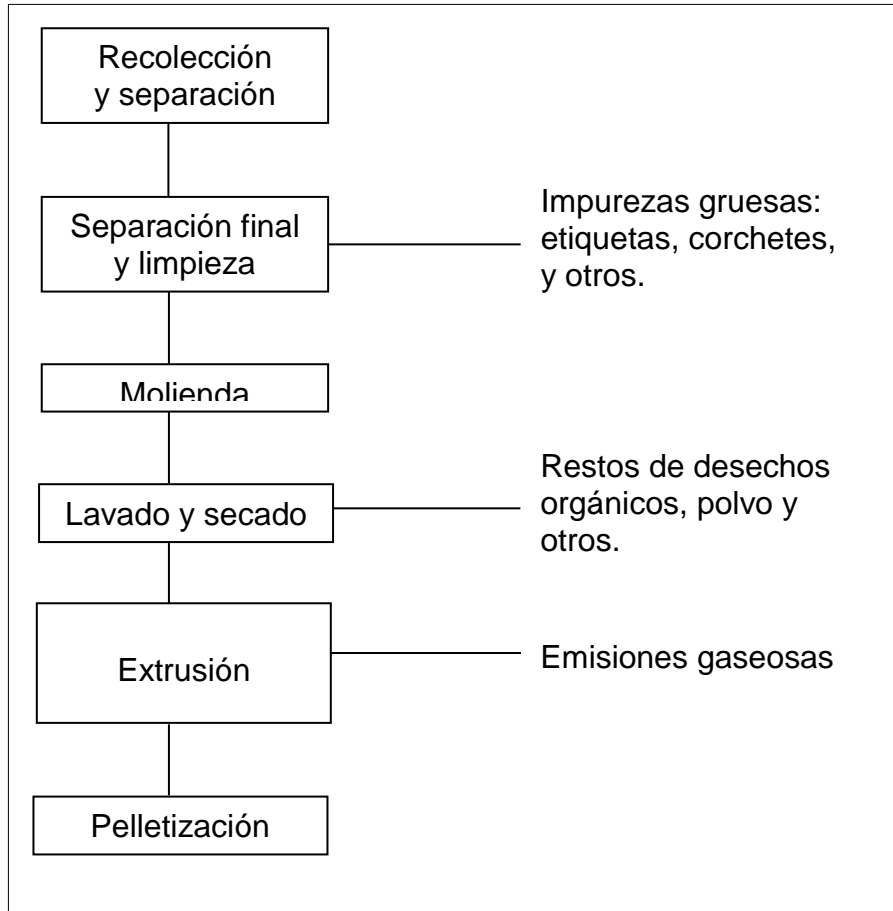
Ácidos-concentrados	Buena-Aceptable
Ácidos-diluidos	Buena
Alcalís	Buena
Alcoholes	Buena
Cetonas	Buena-Aceptable
Grasas y Aceites	Buena-Aceptable
Halógenos	Aceptable-Buena
Hidro-carbonios halógenos	Aceptable-Buena
Hidrocarburos aromáticos	Aceptable

Fuente: ROCA GIRÓN, Iván. *Estudio de las propiedades y aplicaciones industriales del polietileno de alta densidad (PEAD)*. Trabajo de graduación. Facultad de Ingeniería, Ingeniería Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Septiembre 2005. p. 221.

2.2.5. Proceso de reciclaje de HDPE

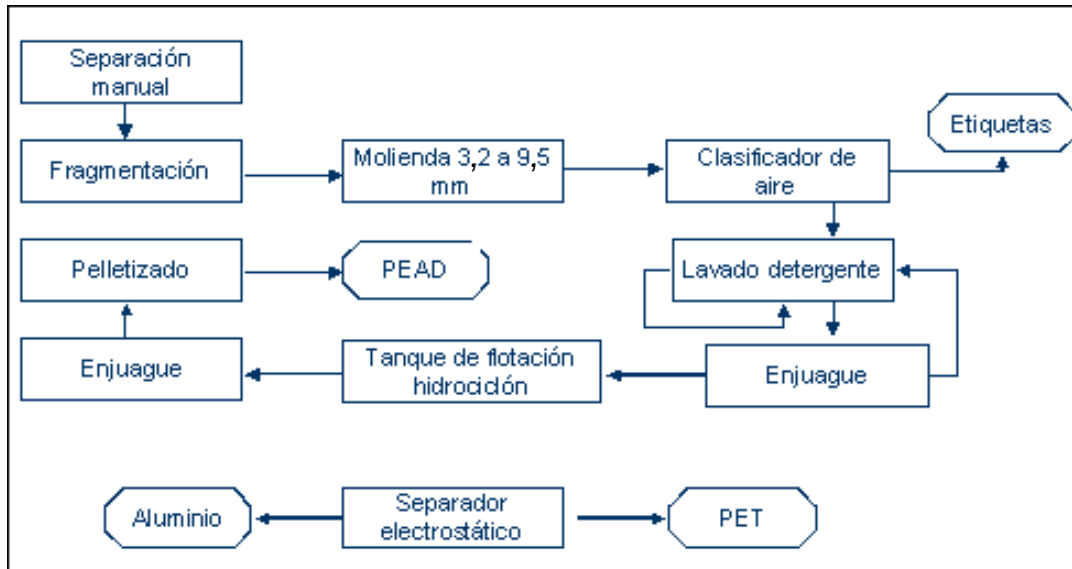
El polietileno es un polímero termoplástico, por lo que tiene un elevado potencial de reciclado. En la figura 5 se muestra un esquema del proceso de recicle del HDPE

Figura 5. **Esquema de producción del reciclaje de plástico**



Fuente: CERVANTES, Luis; ORTEGA, Alberto; GARZA, Rolando. *Compósitos de Madera Plástica*. México: CIDECI, 2006. p. 189.

Figura 6. **Proceso de reciclado de polietileno de alta densidad**



Fuente: CERVANTES, Luis; ORTEGA, Alberto; GARZA, Rolando. *Compósitos de Madera Plástica*. México: CIDECI, 2006. p. 199.

Tabla VII. **Comparación de las propiedades del polietileno de alta densidad virgen y reciclado**

Propiedad	Pead virgen	Pead reprocesado una vez
Índice de fluidez (g/10 mín.)	0,77	0,79
Densidad (g/cm ³)	0,963	0,961
Módulo de flexión (kg/cm ²)	15,396	15,396
Resistencia al impacto Izod (kg. cm/cm)	13	9
Resistencia a la tensión a la ruptura (Kg/cm ²)	155	175
Elongación (%)	555	613

Fuente: ROCA GIRÓN, Iván. *Estudio de las propiedades y aplicaciones industriales del polietileno de alta densidad (PEAD)*. Trabajo de graduación. Facultad de Ingeniería, Ingeniería Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Septiembre 2005. p. 215.

2.2.6. Aplicaciones

El polietileno ha encontrado amplia aceptación en virtud de su buena resistencia química, falta de olor, no toxicidad, poca permeabilidad para el vapor de agua, excelentes propiedades eléctricas y ligereza de peso.

Se usa para la construcción de instalaciones químicas en las cuales se necesita cierta resistencia a los productos químicos. Su película se ha usado para construir pisos resistentes a los ácidos.

Pueden resumirse entonces las principales aplicaciones:

- Caños
- Envases soplados
- Botellas
- Bidones
- Contenedores industriales
- Cajones
- Bolsas de supermercado
- Bolsas tejidas
- Macetas

2.3. Madera

Está compuesta de forma general por tres grupos de sustancias. Las que conforman la pared celular, donde se encuentran las principales macromoléculas, celulosa, poliosas (hemicelulosas) y ligninas, que están presente en todas las maderas. El otro grupo lo conforman las sustancias de

baja masa molar conocidas también como sustancias extraíbles que se encuentran en menor cantidad, y las sustancias minerales.

La proporción y composición química de la lignina y las poliosas difiere para las maderas de coníferas y latifolias, mientras que la celulosa es uniforme en composición en todas las maderas. La proporción de estos componentes varía con la especie, entre la madera de árboles de la misma especie y en diferentes partes del propio árbol, en la madera de la albura y duramen, en dirección radial y longitudinal.

Los parámetros edafoclimáticos influyen en la composición química. Se presentan diferencias entre maderas que provienen de zonas templadas con las que provienen de zonas tropicales.

2.3.1. Celulosa

La molécula de celulosa forma enlaces de hidrógenos intra e intermoleculares. Estos enlaces tienen una gran importancia en lo que respecta a la morfología, rigidez, orientación, resistencia y reactividad de las cadenas celulósicas. La celulosa sólida forma una estructura microcristalina, con una estructura compuesta por parte cristalina y parte amorfa.

Estas unidades contienen en su estructura tres hidroxilos de alcohol (-OH) que forman uniones de hidrógeno dentro de la misma macromolécula (intramolecular). Entre otras macromoléculas de celulosa (intermolecular) y con los grupos hidroxilos provenientes del aire. Por este motivo, todas las fibras de origen vegetal son de naturaleza hidrófila, alcanzando un contenido de humedad del 8 al 12,6 %.

La lignina ocupa los espacios existentes entre las cadenas de celulosa. Es un polímero estructural en el que a diferencia de la celulosa tiene enlaces covalentes adicionales entre las unidades monoméricas. Sus propiedades mecánicas son menores que las de la celulosa. El contenido de lignina en las fibras afecta a su estructura, morfología y propiedades.

2.3.1.1. Propiedades de la celulosa

La estructura molecular de la celulosa es responsable de su estructura macromolecular y determina las propiedades químicas y físicas de la fibra. Las fibras naturales pueden ser consideradas en sí mismas como materiales compuestos reforzados por microfibrillas rígidas y resistentes de celulosa. Esto dentro de una matriz viscoelástica formada por un complejo hemicelulosa/lignina.

Las propiedades mecánicas de las fibras dependen del tipo de celulosa. Esto debido a que las celdas de cada tipo tienen su propia geometría y condicionan sus propiedades mecánicas. Las características estructurales contribuyen a que tales resistencias no puedan ser alcanzadas en la práctica. Entre ellas destacan: el grado de cristalinidad de la celulosa, el ángulo microfibrilar y el contenido de la celulosa.

Tabla VIII. **Propiedades mecánicas de algunas fibras naturales**

Fibra	Densidad (g/cm ³)	Resistencia a rotura (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Elongación a rotura (%)	Módulo específico
Cañamo	1,48	600 - 1100	32 - 70	1,6	47
Lino	1,54	344 - 1035	27 - 80	2,7 - 3,2	43 - 57
Sisal	1,45	510 - 850	9 - 38	2,0 - 2,5	9 - 29
Yute	1,3 - 1,5	393 - 1000	10 - 59	1,5 - 1,8	7 - 38
Algodón	1,5 - 1,6	287 - 597	5,5 - 12,6	7,0 - 8,0	-
Ramio	1,5	400 - 398	24 - 128	3,6 - 3,8	-
Coco	1,20 - 1,44	175	4 - 6	30,0	-
Conífera Kraft	1,5	1000	40	-	-
Bagazo	1,25	290	17	-	-
Bambú	1,50	575	27	3,0	-
Banana	1,35	500	12	5,9	-
Fibra de vidrio tipo E	2,5	2000 - 3500	70 - 73	2,5	28 - 29

Fuente: CERVANTES, Luis; ORTEGA, Alberto; GARZA, Rolando. *Compósitos de Madera Plástica*. México: CIDECI, 2006. p. 234.

2.4. Interfase plásticomadera

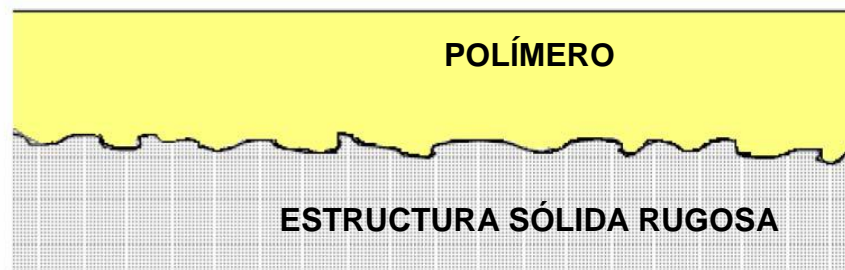
Un concepto fundamental, a la hora de plantearse el empleo de las fibras naturales como refuerzo de un material polimérico, es la compatibilidad existente entre estos dos materiales. Esta compatibilidad normalmente se caracteriza por tener un cierto grado de incompatibilidad, ya que las fibras tienen un marcado carácter hidrofílico. Mientras que los polímeros lo tienen de carácter antagonista como hidrófobo.

La adhesión entre las fibras de refuerzo y la matriz polimérica puede ser atribuida a una serie de mecanismos que se pueden dar en la interfase, como fenómenos aislados o por interacción entre ellos. El rasgo más importante de la interfase es la adhesión del material de la matriz al refuerzo; en ausencia de

esta adhesión las fibras serán arrancadas de la matriz sin romperse, anulando el efecto del refuerzo.

Debido a las características físicas, de los termoplástico y la fibra de madera, se espera que el mecanismo de adhesión mecánica de la interfase sea el predominante. La interacción se producirá únicamente por la interpenetración mecánica de dos superficies; el termoplástico, una vez líquido, moja cada detalle de la superficie de la fibra. La resistencia a la tracción de esta interfase probablemente no será alta a menos que haya un gran número de entrantes y salientes en la superficie de la fibra, es decir, dependerá del grado de rugosidad de la superficie.

Figura 7. **Unión mecánica formada cuando un polímero líquido moja una superficie sólida rugosa**



Fuente: LUCANA, Masías; DANTE, Ítalo. *Diseño de un molde para la fabricación de probetas de materiales compuestos de matriz plástica y refuerzos de fibras naturales mediante compresión térmica*. Tesis. Facultad de Ciencias e Ingeniería. Pontificia Universidad Católica del Perú, Mayo 2008. p. 197.

2.5. Proceso de producción

Conjunto de actividades orientadas a la transformación de recursos o factores productivos en bienes o servicios. En este proceso intervienen la información y la tecnología, que interactúan con personas. Su objetivo último es la satisfacción de la demanda.

2.5.1. Extrusión

Este proceso se utiliza ampliamente en la industria de plásticos para la producción en continuo de piezas con sección constante de materiales termoplásticos (y algunos termoestables). Se emplea también para recubrimiento de superficies y en el moldeo por soplado y termoconformado para la obtención de las preformas.

También consiste en obligar a un material fundido a pasar a través de una boquilla o matriz que tiene la forma adecuada, para obtener el diseño deseado. El equipo debe ser capaz de proporcionar sobre el material suficiente presión de una forma continua, uniforme y reblandecer y acondicionar el material de forma que pueda ser extruído.

2.5.2. Inyección

Es el método de moldeo más característico de la industria de plásticos. Consiste básicamente en fundir un material plástico en condiciones adecuadas e introducirlo a presión en las cavidades de un molde donde se enfría a una temperatura apta para que las piezas puedan ser extraídas sin deformarse.

En el moldeo por inyección son de gran importancia las características de los polímeros tales como peso molecular y distribución, configuración química y morfología, cristalinidad, estabilidad, y otros. El comportamiento reológico de los materiales es fundamental en el moldeo por inyección; puede darse el caso, por ejemplo, de que un plástico demasiado viscoso no llene el molde a velocidades de cizalla bajas, pero que pueda llenarlo si se modifican las condiciones de procesado.

El proceso, en lo que a moldeo se refiere, puede dividirse en dos fases. En la primera tiene lugar la fusión del material y en la segunda la inyección en el molde.

2.5.3. Moldeo por soplado

Mediante el proceso de soplado pueden fabricarse cuerpos huecos como son depósitos de combustibles, bidones, tablas de surf, depósitos de aceite de calefacción y botellas. El proceso consiste básicamente en insuflar aire en una preforma tubular fundida que se encuentra en el interior del molde. Se emplea exclusivamente con materiales termoplásticos.

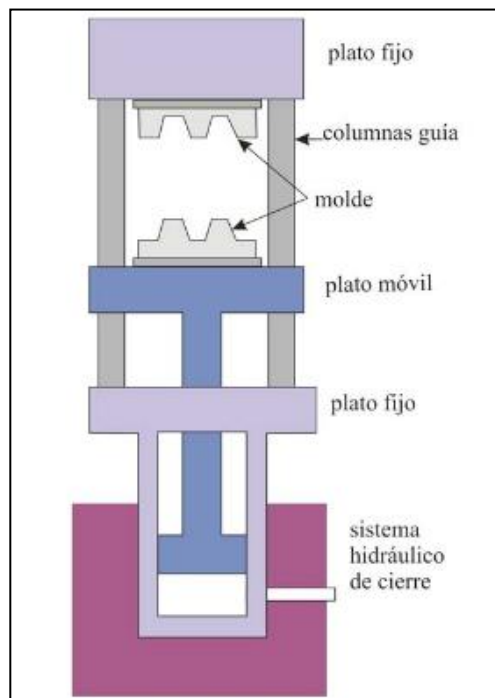
Para ello son necesarias dos piezas fundamentales: una extrusora o una inyectora y una unidad de soplado.

2.5.4. Moldeo por compresión

En el moldeo por compresión para moldear materiales termoestables. En la figura 8, se muestra una prensa empleada en moldeo por compresión. Puede considerarse que el ciclo comienza con la apertura del molde para la extracción de la pieza obtenida en el ciclo anterior.

Una vez limpio el molde se colocan en él las inserciones metálicas si las hubiere y se introduce el material de moldeo, bien en forma de polvo o en forma de pastilla; se cierra el molde caliente y se aplica presión. En ocasiones se abre después un instante para permitir la salida de humedad y materias volátiles que pudieran haber quedado atrapadas o que se generan durante el entrecruzamiento del material. Finalmente, se aplica toda la presión al molde caliente y se mantiene el tiempo necesario hasta que el material haya curado totalmente.

Figura 8. **Prensa para moldeo por compresión**



Fuente: BUXÓ, Ramon; PIQUÉ, Raquel. ASTM D143 – 09 *Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. Section 12: Hardness (Janka). Section 13: (Compression Perpendicular to Grain)*. España: Grupo planeta, 2008. p. 197.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Es cualquier característica observable del objeto de estudio, y que es susceptible de adaptar distintos valores o de ser expresado en varias categorías. A la vez, una variable, depende de cada caso y situación, así como del nivel de generalidad en que se situé.

3.1.1. Variables de control

Son las que se utilizan para eliminar posibles interferencias entre la variable dependiente e independiente.

Tabla IX. Determinación de variables de control

Variable	Unidades		Factor potencial de diseño		Factores perturbadores	
			Constante	Variable	Controlable	No controlable
Cantidad de materia vegetal (aserrín).	libras	lb.		X	X	
Cantidad de polímero.	libras	lb.		X	X	
Tiempo de residencia horno.	minutos	min.		X	X	
Diámetro de partícula de materia vegetal.	milímetro	mm.	X		X	

Fuente: elaboración propia.

3.1.2. Variables dependientes y respuesta

Es aquella característica, propiedad o cualidad de una realidad o evento que estamos investigando. Es el objeto de estudio, sobre la cual se centra la investigación en general.

Tabla X. **Determinación de las variables dependientes**

Variable	Unidades		Factor potencial de diseño		Factores perturbadores	
			Constantes	VARIABLES	Controlable	No controlable
Densidad.	Gramos sobre centímetros cúbicos	g/cm ³		X		X
Humedad relativa de la madera plástica.	Porcentaje	%		X		X
Resistencia a la ruptura.	-	kPa		X		X
Temperatura de Inflamación.	Grados Celsius	°C		X		X

Fuente: elaboración propia.

3.1.3. Variables independientes

Es aquella propiedad, cualidad o característica de una realidad, evento o fenómeno, que tiene la capacidad para influir, incidir o afectar a otras variables. Se llama independiente, porque esta variable no depende de otros factores para estar presente en esa realidad en estudio.

Tabla XI. **Determinación de variables independientes**

Variable	Unidades		Factor potencial de diseño		Factores perturbadores	
			Constante	Variable	Controlable	No controlable
Tiempo	Minutos	min.		X	X	
Presión	Toneladas	t		X	X	
Contenido de humedad en la fibra vegetal	Porcentaje	%		X	X	
Temperatura	Grados Celsius	°C		X	X	

Fuente: elaboración propia.

3.1.4. Variables de medición

Es una clasificación acordada con el fin de describir la naturaleza de la información contenida dentro de los números asignados a los objetos y, por lo tanto, dentro de una variable.

Tabla XII. **Determinación de las variables de medición a escala laboratorio**

Variable	Unidades		Instrumento de medición
Cantidad de materia vegetal.	libras	lb.	Balanza
Cantidad de materia prima polímero.	libras	Lb	Balanza
Tiempo residencia en horno.	Minutos	Min	Cronometro

Continuación de la tabla XII.

Temperatura de horno.	Grados Celsius	°C	Termómetro digital de horno
Porcentaje de humedad relativa.	Porcentaje	%	-
Presión de compresión.	Toneladas	t	Prensa hidráulica
Densidad de la madera plástica.	Gramos sobre centímetros cúbicos	g/cm ³	Vernier y balanza

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación de campo de estudio

El estudio se enfocará en la elaboración de madera plástica a partir de residuos de aserrín de madera. Se realizará utilizando como aglutinante polimérico el polietileno de alta densidad.

- Área: tecnología de los materiales
- Industria: ingeniería de Polímeros
- Línea de investigación: ciencia de los materiales
- Proceso: evaluación de los parámetros adecuados de elaboración de madera plástica aplicando componentes naturales y polímero reciclado de polietileno de alta densidad (*HDPE*) inducida por termocompresión.
- Ubicación: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, (Fiusac) Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII), Laboratorio de Tecnología de la Madera.
- Condiciones: temperatura ambiente que varía según la época del año entre 15-30 °C.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigador: Julio César Arriola Zayas.
- Asesor: Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus.
- Directora del Centro de Investigaciones: Inga. Telma Maricela Cano Morales.
- Coordinadora Tecnología de la Madera: Inga. Ericka Cano Díaz.

3.4. Recursos materiales disponibles

Son los bienes tangibles que la organización puede utilizar para el logro de sus objetivos.

3.4.1. Materia prima

- Materia vegetal: aserrín obtenido por residuo que generan los diferentes aserraderos, ubicados en la ciudad de Guatemala.
- Material polimérico: compra de polietileno de alta densidad reciclado, como *pellets*.

3.4.2. Equipo para la elaboración de probetas de madera plástica

- Molde de metal circular (dimensiones)
- Extractor de aserrín
- Prensa hidráulica con capacidad de 5 toneladas
- Horno eléctrico
- Tamices de 40 y 60

3.4.3. Equipo para la determinación de los parámetros comparativos a evaluar

- Balanza
- Termómetro infrarrojo
- Horno eléctrico
- Plancha eléctrica
- Pinzas
- Balanza de humedad
- Vernier eléctrico
- Guantes de cuero

3.5. Técnica cuantitativa

Para determinar los factores respuesta de la madera plástica, sean dureza, densidad, resistencia a la ruptura y temperatura de ignición, se utilizarán para los requisitos de los procedimientos y regulaciones de ASTM. Siendo así para cada prueba las siguientes.

Tabla XIII. Metodología de trabajo

Prueba	Norma astm	Título en inglés	Título en español
Humedad	ASTM D4442 - 07	<i>Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-Base Materials</i>	Métodos de prueba estándar para el contenido de humedad directa Medición de la Madera y Materiales Madera-Base

Continuación de la tabla XIII.

Densidad	ASTM D2395 - 07ae1	<i>Standard Test Methods for Specific Gravity of Wood and Wood-Based Materials</i>	Métodos de prueba estándar para la gravedad específica de la madera y materiales de madera
Resistencia a la ruptura	ASTM D143 - 09	<i>Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber Section 12:Hardness (Janka) Section 13: (Compression Perpendicular to Grain)</i>	Métodos de prueba estándar para la Pequeña claras muestras de madera Sección 12: dureza (Janka) Sección 13: (compresión perpendicular a la fibra)
Temperatura de Inflamación	ASTM D1929 - 12	<i>Standard test method for determining ignition temperature of plastics.</i>	Método de prueba estándar para determinar la temperatura de ignición de los plásticos
	UNE 23010:1976	<i>Classification of fires</i>	Clases de fuegos

Fuente: BUXÓ, Ramon; PIQUÉ, Raquel. ASTM D143 – 09 *Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. Section 12: Hardness (Janka). Section 13: (Compression Perpendicular to Grain)*. España: Grupo planeta, 2008. p. 207.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Esta etapa consiste en acudir a diversos lugares informativos como archivos, bibliotecas, hemerotecas, librerías, videotecas, filmotecas, museos, institutos de investigación, Internet, y otros. Para ello es importante tener presentes las diversas fuentes que nos pueden ser útiles en la tarea de recabar información para nuestra investigación.

3.6.1. Recolección de datos para elaboración de probetas

Para ello, es imprescindible realizar un proceso de recolección de datos en forma planificada y teniendo claros objetivos sobre el nivel y profundidad de la información a recolectar.

Tabla XIV. **Probetas de composición de 90 % de aglutinante y 10 % de aserrín**

Formulación	Temperatura de Horneado [°C]	Tiempo de Horneado [mín]	Densidad [g/cm ³]	Temperatura de Inflamabilidad [°C]	Resistencia a la Ruptura [N]	Dureza Janka [N]
F1	T1	t1				
		t2				
		t3				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Probetas de composición de 80 % de aglutinante y 20 % de aserrín**

Formulación	Temperatura de Horneado [°C]	Tiempo de Horneado [mín]	Densidad [g/cm ³]	Temperatura de Inflamabilidad [°C]	Resistencia a la Ruptura [N]	Dureza Janka [N]
F2	T1	t1				
		t2				
		t3				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Probetas de composición de 70 % de aglutinante y 30 % de aserrín**

Formulación	Temperatura de Horneado [°C]	Tiempo de Horneado [mín]	Densidad [g/cm ³]	Temperatura de Inflamabilidad [°C]	Resistencia a la Ruptura [N]	Dureza Janka [N]
F3	T1	t1				
		t2				
		t3				

Fuente: elaboración propia.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Es la operación intelectual que consiste en el establecimiento de las categorías y grupos que reflejan la estructura orgánica o funcional de un fondo.

Tabla XVII. **Cálculo de la medio aritmética**

Formulación	Tiempo de horneado (mín.)	Presión de compresión [psi]	Densidad [g/cm ³]			Temperatura de inflamación (°C)			Dureza (kPa)			Fuerza de ruptura (kPa)					
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
F1	t1																
	t2																
	t3																
F2	t1																
	t2																
	t3																
F3	t1																
	t2																
	t3																

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Cálculo de la varianza**

Formulación	Tiempo de horneado (mín.)	Presión de compresión [psi]	Densidad [g/cm ³]	Temperatura de inflamación (°C)	Dureza (kPa)	Fuerza de ruptura (kPa)
F1	t1					
	t2					
	t3					
F2	t1					
	t2					
	t3					

Continuación de la tabla XVIII.

F3	t1					
	t2					
	t3					

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Cálculo de la desviación estándar**

Formulación	Tiempo de horneado (mín.)	Presión de compresión [psi]	Densidad [g/cm ³]	Temperatura de inflamación (°C)	Dureza (kPa)	Fuerza de ruptura (kPa)
F1	t1					
	t2					
	t3					
F2	t1					
	t2					
	t3					
F3	t1					
	t2					
	t3					

Fuente: elaboración propia.

3.8. Análisis estadístico

Se evaluará la información cuantitativa obtenida. Se conocerá la dispersión de los resultados y cuantificar la variación de las propiedades de la madera plástica al variar, tanto las condiciones a la cual se someterá como la variación de mezcla plástico – madera.

3.8.1. Análisis de varianza

Se utilizó para evaluar el efecto de la formulación y el tiempo de residencia en el horno sobre las propiedades de la madera plástica. Manteniendo así una constante temperatura del horno y presión de compresión, para la cual se utilizó el siguiente análisis.

Tabla XX. 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	$s_1^2 = \frac{SSA}{a-1}$	$f_1 = \frac{s_1^2}{s_2^2}$
	B	SSB	b-1	$s_2^2 = \frac{SSA}{b-1}$	$f_2 = \frac{s_1^2}{s_2^2}$
Interacción de dos Factores	AB	SS(AB)	(a-1)(b-1)	$s_3^2 = \frac{SS(AB)}{(a-1)(b-1)}$	$f_3 = \frac{s_3^2}{2^2}$
	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.

- Fórmulas para el cálculo de cuadrados:

$$\circ \quad SST = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{T^2}{abn} \quad [\text{Ec. 1}]$$

$$\circ \quad SSA = \frac{\sum_{i=1}^a T_i^2}{bn} - \frac{T^2}{abn} \quad [\text{Ec. 2}]$$

$$\circ \quad SSB = \frac{\sum_{j=1}^b T_j^2}{an} - \frac{T^2}{abn}$$

[Ec. 3]

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

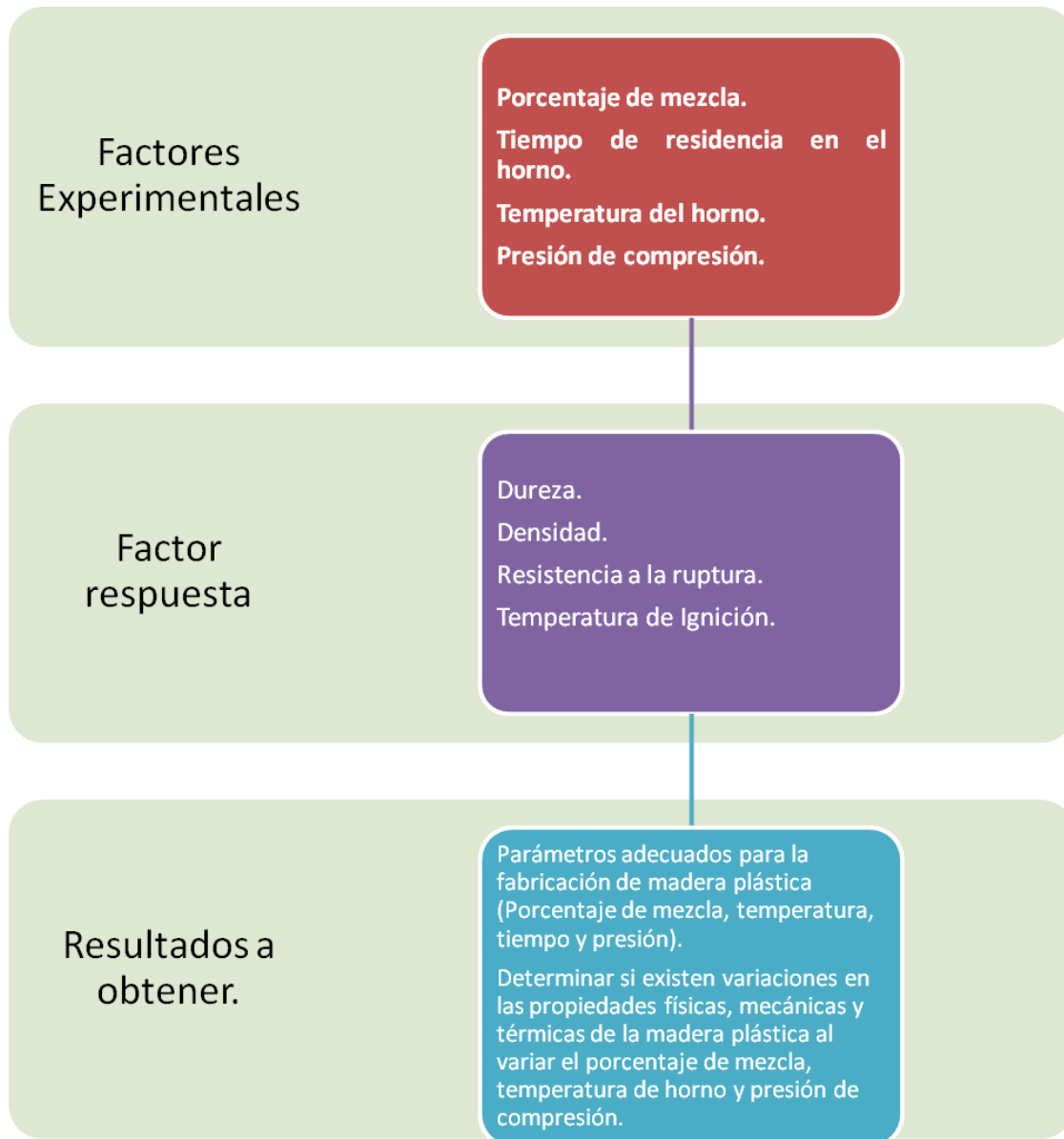
[Ec. 4]

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

3.8.2. Factores experimentales y respuesta

En un diseño experimental se manipulan deliberadamente una o más variables, vinculadas a las causas, para medir el efecto que tienen en otra variable de interés.

Figura 9. **Esquema de factores experimentales**



Fuente: elaboración propia.

3.9. Plan de análisis de resultados

Proceso a través del cual ordenamos, clasificamos y presentamos los resultados de la investigación en cuadros estadísticos, en graficas elaboradas y sistematizadas con base en técnicas estadísticas con el propósito de hacerlos comprensibles.

Tabla XXI. **Análisis metodológico para la obtención de los resultados**

Núm.	Objetivo	Justificación
1	Determinar la proporción del uso de polímero reciclado como aglutinante en aserrín de madera.	Se determinó la mejor proporción plástico-madera, evaluando 36 probetas que arrojaran los resultados obtenidos de mayor temperatura de inflamabilidad, resistencia a la ruptura y dureza.
2	Determinar la temperatura de procesamiento adecuado que aglutina el plástico a la madera.	Se determinó mediante la comparación de tiempos de residencia que permanecía la probeta en el horno, tomando en cuenta la menor temperatura de horneado, con una buena conformación aglutinante del plástico sobre la madera y los mejores resultados físico-mecánicos.
3	Determinar la incidencia del tiempo de residencia en el horno sobre las propiedades de la madera plástica.	Se determinó la incidencia de tiempo de horneado considerando, el menor tiempo de horneado, con una buena conformación aglutinante del plástico sobre la madera y que obtuviera los mayores resultados físicomecánicos.
4	Determinar la presión de prensado adecuada sobre las propiedades de la madera plástica.	Se determinó presión de compresión adecuada en base a las pruebas preliminares realizadas y determinar la menor fuerza de presión que se pueda aplicar y muestre la mejor conformación del aglutinante plástico sobre la madera y que obtuviera los mayores resultados físicomecánicos.
5	Determinar las propiedades físicas y mecánicas de la madera plástica con aglutinante polímero reciclado de polietileno de alta densidad.	Se determinó evaluando la variación de formulación, plástico-madera, como tiempo y temperatura de residencia en el horno.

Continuación de la tabla XXI.

6	Determinar las propiedades mecánicas de la madera plástica con aglutinante polímero reciclado de polietileno de alta densidad.	Se determinó evaluando la incidencia de la variación de tiempo de residencia en el horno sobre las propiedades mecánicas.
7	Determinar las propiedades térmicas de la madera plástica con aglutinante polímero reciclado de polietileno de alta densidad.	Se determinó evaluando las distintas formulaciones quien tuvo la mayor temperatura de inflamabilidad.

Fuente: elaboración propia.

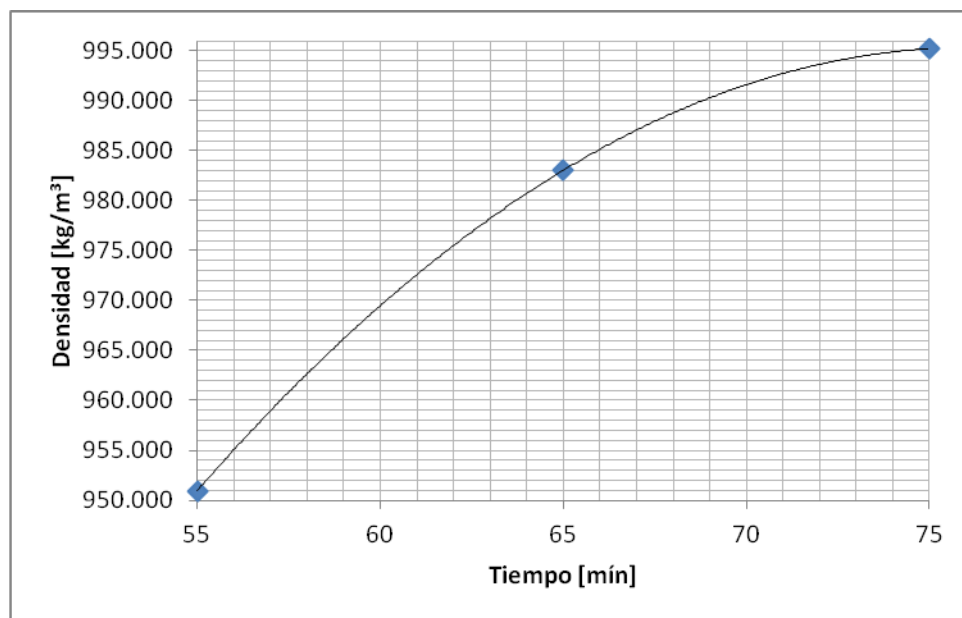
3.9.1. Programas a utilizar para análisis de datos

- Microsoft Excel 2010:
Hoja de cálculo electrónica para facilitar operaciones matemáticas.
- Microsoft Visio 2010:
Software utilizado para facilitar la elaboración de diagramas de flujo.
- Microsoft Word 2010:
Hoja de datos para la elaboración del informe.

4. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados:

Figura 10. **Densidad en función del tiempo de residencia en el horno, con formulación de 30 % de desechos de aserrín y 70 % de polietileno de alta densidad de reciclado primario**

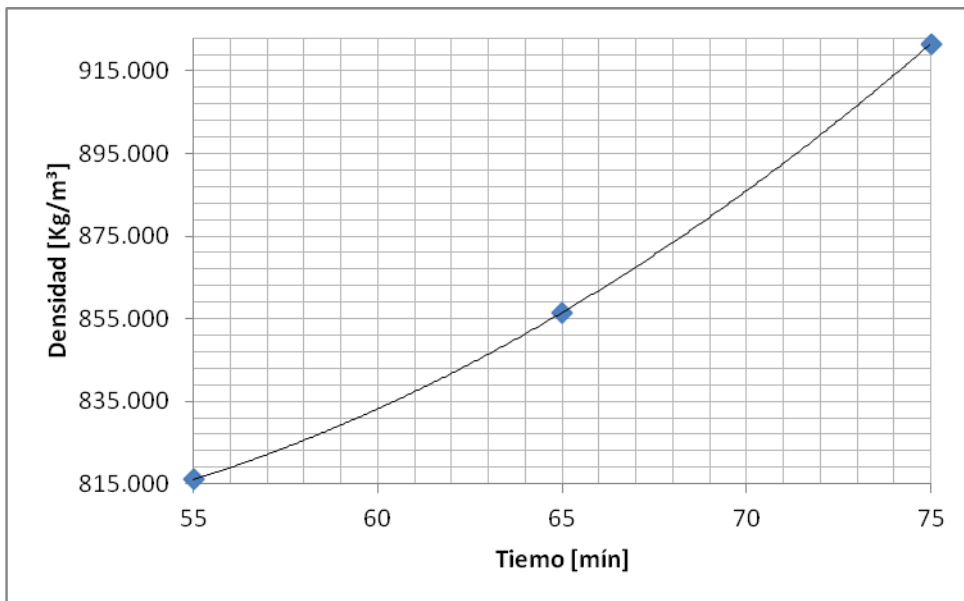


Fuente: elaboración propia, empleando sección datos calculados, tabla I.

Modelo matemático	Coefficiente de correlación R ²	Intervalo de validez
$\rho = -0,0997t^2 + 15,172t + 418,04$	1	[55 , 75]

[Ec. 5]

Figura 11. **Densidad en función del tiempo de residencia en el horno, con formulación de 40 % de desechos de aserrín y 60 % de polietileno de alta densidad de reciclado primario**

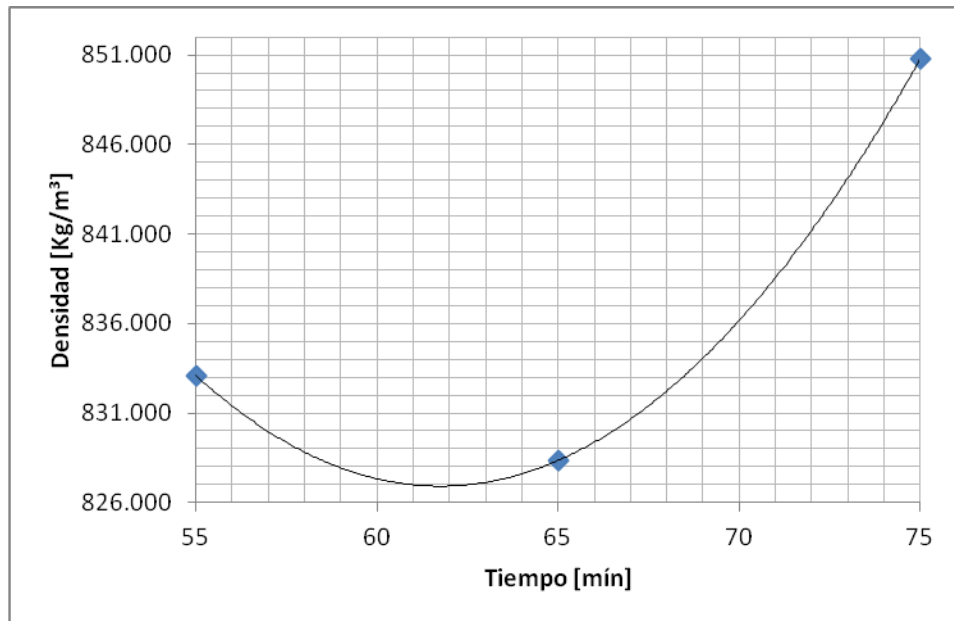


Fuente: elaboración propia, empleando sección datos calculados, tabla II.

Modelo matemático	Coefficiente de correlación R^2	Intervalo de validez
$\rho = 0,123t^2 - 10,715t + 1\ 033.1$	1	[55 , 75]

[Ec. 6]

Figura 12. **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 alta densidad de reciclado primario**

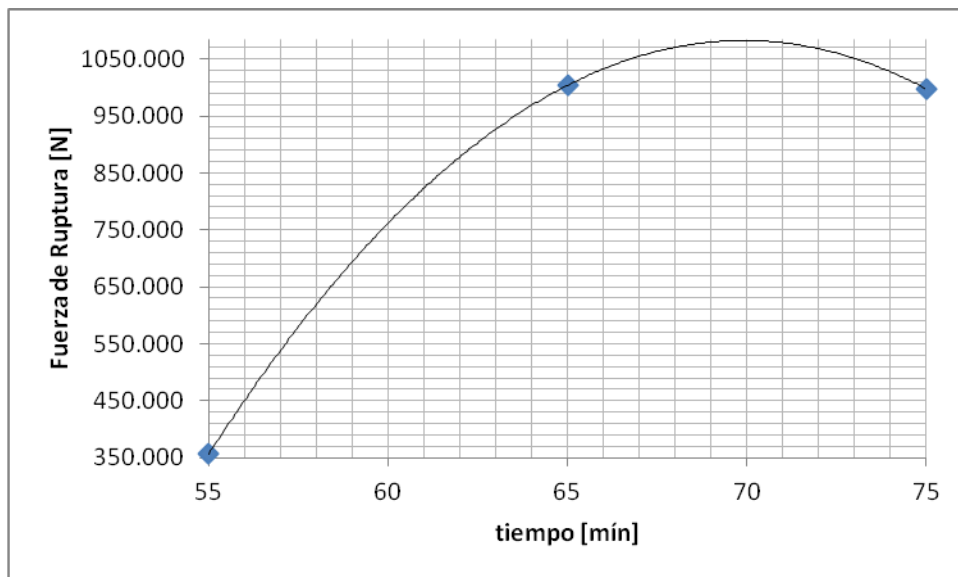


Fuente: elaboración propia, empleando sección datos calculados, tabla III.

Modelo matemático	Coefficiente de correlación R ²	Intervalo de validez
$\rho = 0,1359t^2 - 16,783t + 1\ 345$	1	[55 , 75]

[Ec. 7]

Figura 13. **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 de alta densidad de reciclado primario**

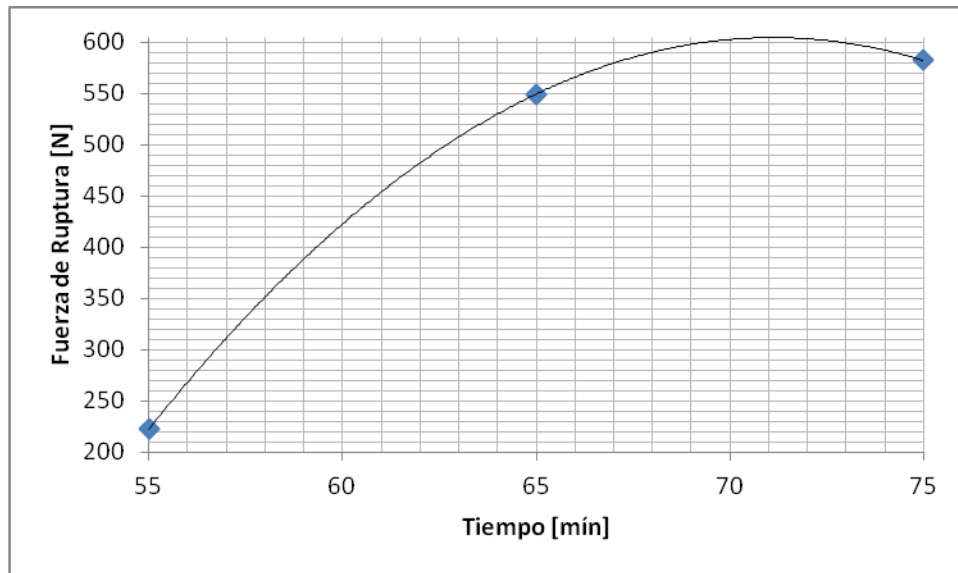


Fuente: elaboración propia, empleando sección datos calculados, tabla IV.

Modelo matemático	Coefficiente de correlación R ²	Intervalo de validez
$F = -3,27x^2 + 457,15x - 14\ 895$	1	[55 , 75]

[Ecu 8]

Figura 14. **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 alta densidad de reciclado primario**

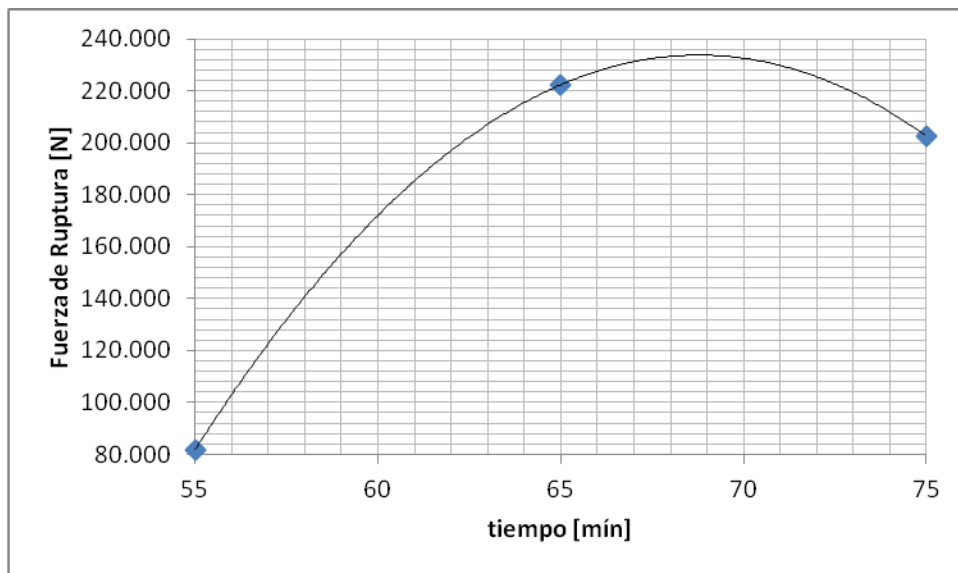


Fuente: elaboración propia, empleando sección datos calculados, tabla v.

Modelo matemático	Coefficiente de correlación R ²	Intervalo de validez
$F = -1,4715x^2 + 209,28x - 6\ 836,8$	1	[55 , 75]

[Ec. 9]

Figura 15. **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**

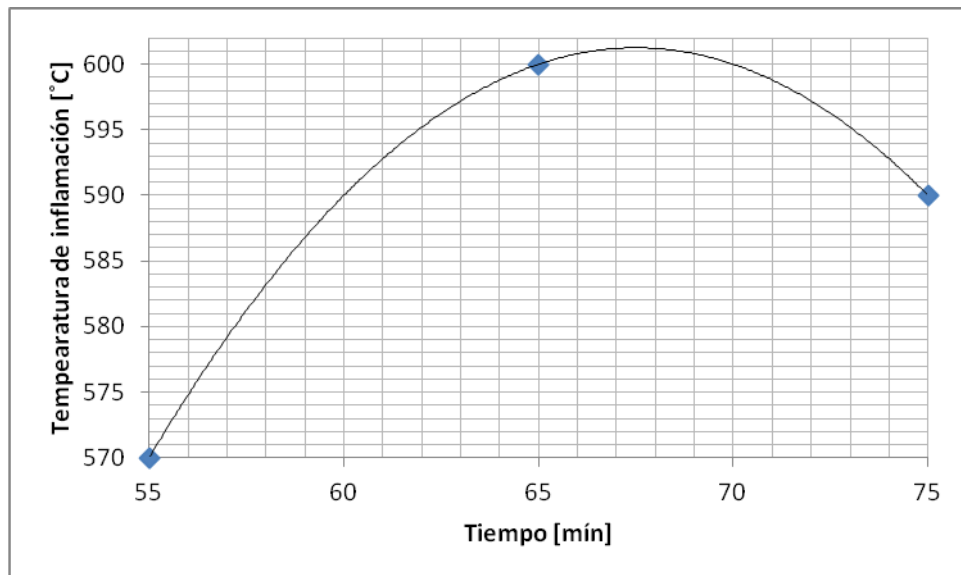


Fuente: elaboración propia, empleando sección datos calculados, tabla VI.

Modelo matemático	Coefficiente de correlación R ²	Intervalo de validez
$F = -0,8011x^2 + 110,2x - 3\,555,7$	1	[55 , 75]

[Ec. 10]

Figura 16. **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 de alta densidad de reciclado primario**

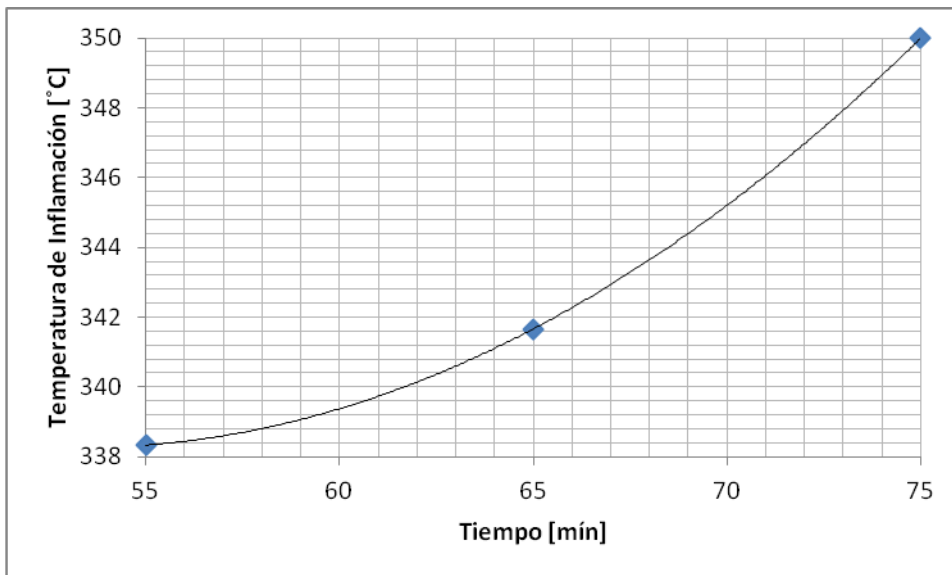


Fuente: elaboración propia, empleando sección datos calculados, tabla VII.

Modelo Matemático	Coefficiente de correlación R ²	Intervalo de validez
$T_{if} = -0,2t^2 + 27 t - 310$	1	[55 , 75]

[Ec. 11]

Figura 17. **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 de alta densidad de reciclado primario**

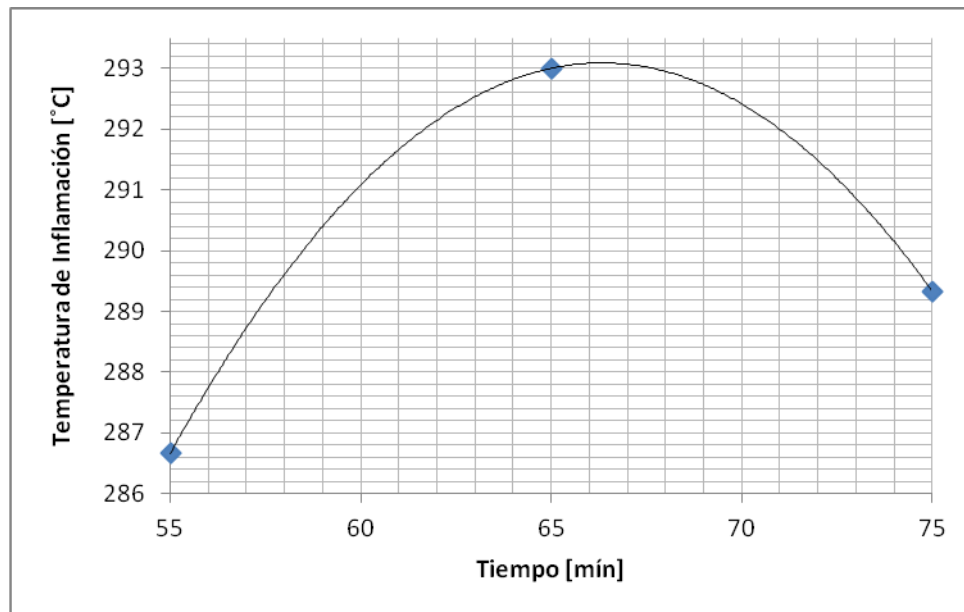


Fuente: elaboración propia, empleando sección datos calculados, tabla VIII.

Modelo matemático	Coefficiente de correlación R ²	Intervalo de validez
$T_{if} = 0,025x^2 - 2,6667x + 409,37$	1	[55 , 75]

[Ec. 12]

Figura 18. **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 alta densidad de reciclado primario**

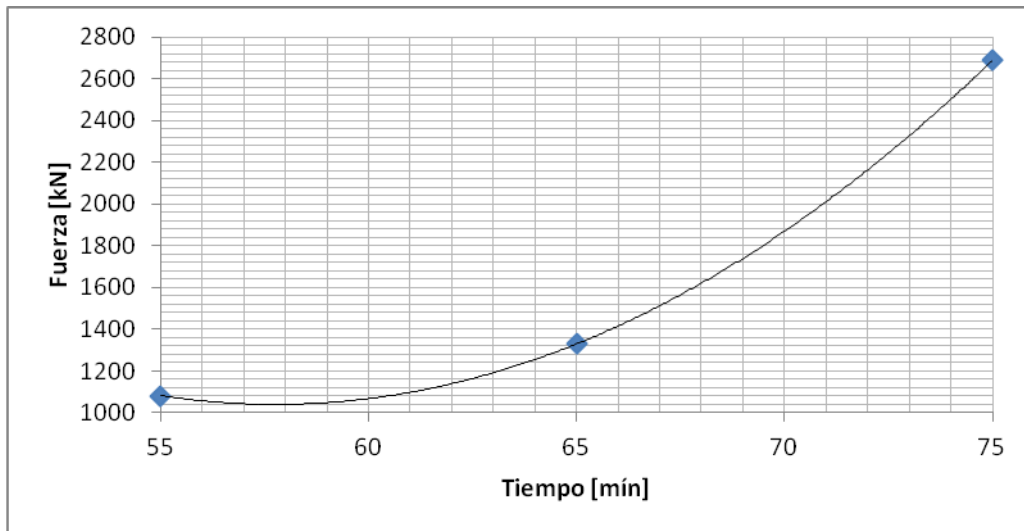


Fuente: elaboración propia, empleando sección datos calculados, tabla IX.

Modelo matemático	Coefficiente de correlación R^2	Intervalo de validez
$T_{if} = -0,05x^2 + 6,6333x + 73,083$	1	[55 , 75]

[Ec. 13]

Figura 19. **Dureza Janka a diferentes tiempos de residencia en el horno para probetas de madera plástica, con formulación de 30 % de residuos de aserrín y 70 % de polietileno de alta densidad de reciclado primario**

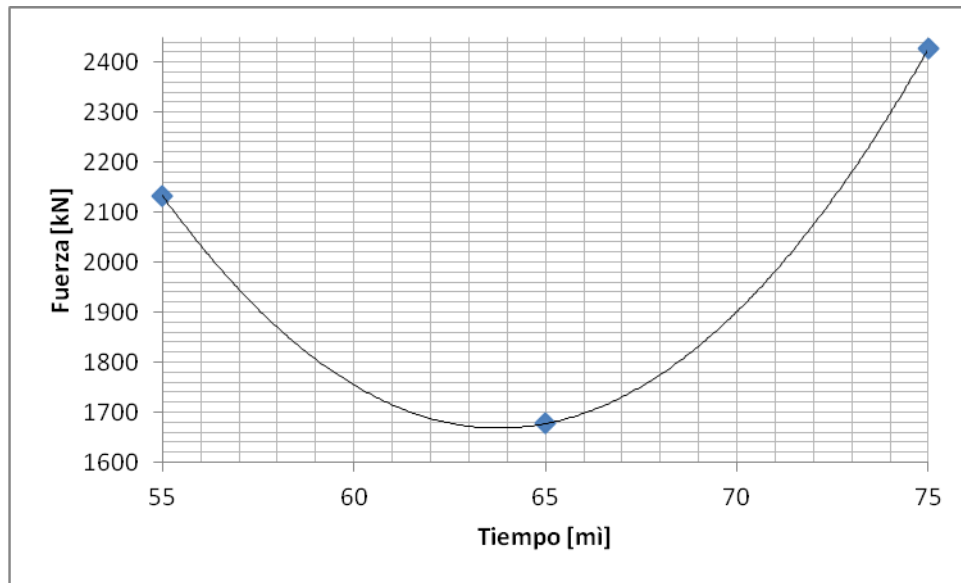


Fuente: elaboración propia, empleando sección datos calculados, tabla X, XI y XII.

Modelo matemático	Coefficiente de correlación R ²	Intervalo de validez
$F = 5,548t^2 - 641,0t + 19\ 555$	1	[55 , 75]

[Ec. 14]

Figura 20. **Dureza Janka a diferentes tiempos de residencia en el horno para probetas de madera plástica, con formulación de 40 % de residuos de aserrín y 60 % de polietileno de alta densidad de reciclado primario**

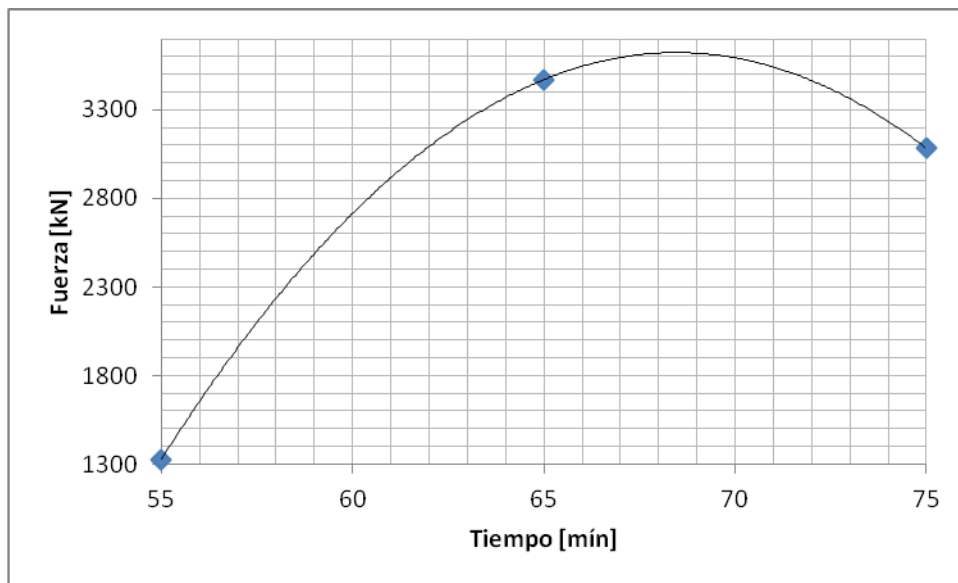


Fuente: elaboración propia, empleando sección datos calculados, tabla XIII, XIV y XV.

Modelo matemático	Coefficiente de correlación R ²	Intervalo de validez
$F = 6,03t^2 - 769,2t + 26\ 200$	1	[55 , 75]

[Ec. 15]

Figura 21. **Dureza Janka a diferentes tiempos de residencia en el horno para probetas de madera plástica, con formulación de 50 % de residuos de aserrín y 50 % de polietileno de alta densidad de reciclado primario**

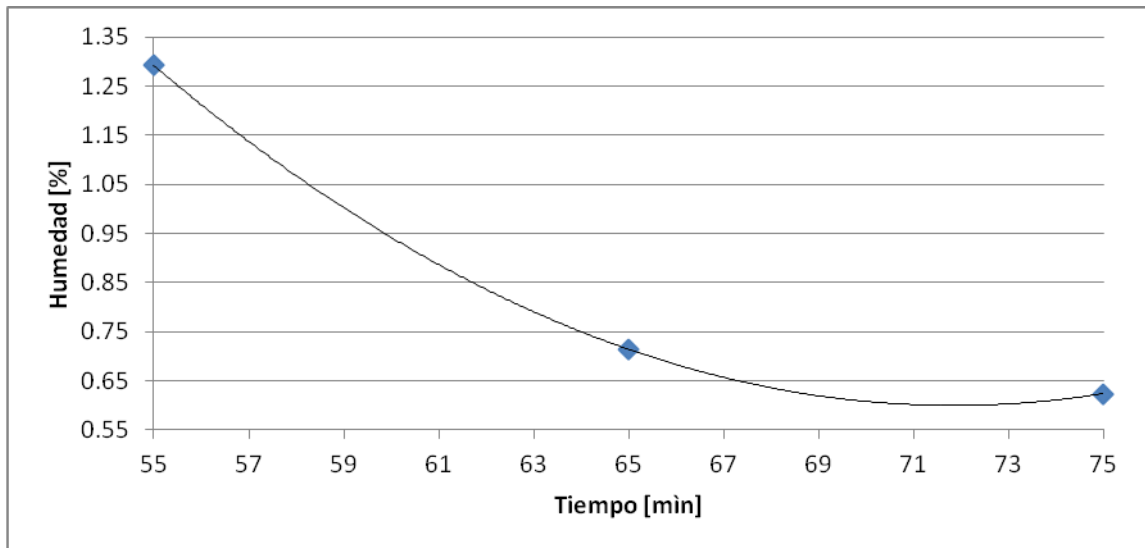


Fuente: elaboración propia, empleando sección datos calculados, tabla XVI, XVII y XVIII.

Modelo matemático	Coefficiente de correlación R ²	Intervalo de validez
$F = -12,65t^2 + 1\,733t - 55\,706$	1	[55 , 75]

[Ec.16]

Figura 22. **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 de alta densidad de reciclado primario**

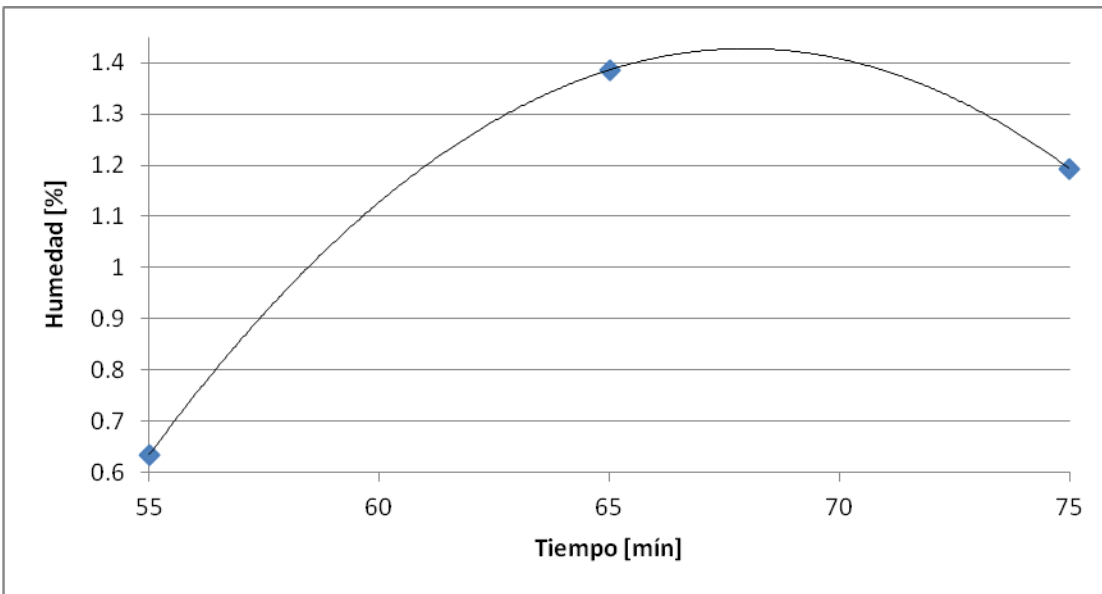


Fuente: elaboración propia, empleando sección datos calculados, tabla XIX.

Modelo matemático	Coefficiente de correlación R ²	Intervalo de validez
$\%H = 0,002t^2 - 0,350t + 13,19$	1	[55 , 75]

[Ec. 17]

Figura 23. **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 de alta densidad de reciclado primario**

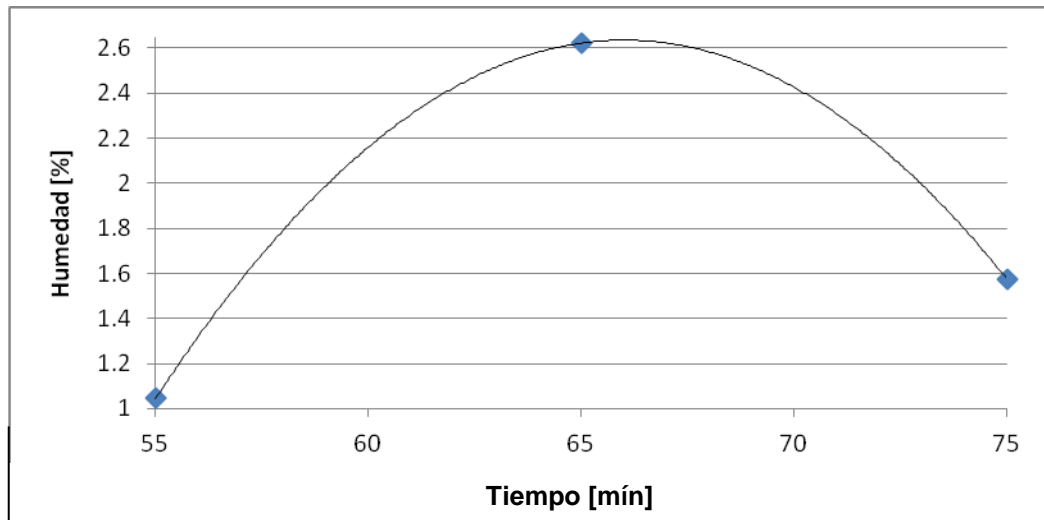


Fuente: elaboración propia, empelando sección datos calculados, tabla XX.

Modelo matemático	Coefficiente de correlación R ²	Intervalo de validez
$\%H = -0,004t^2 + 0,641t - 20,37$	1	[55 , 75]

[Ec. 18]

Figura 24. **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 de alta densidad de reciclado primario**



Fuente: elaboración propia, empelando sección datos calculados, tabla XXI.

Modelo matemático	Coefficiente de correlación R ²	Intervalo de validez
$%H = -0,013t^2 + 1,732t - 54,53$	1	[55 , 75]

[Ec. 19]

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

La elaboración de madera plástica por medio de compresión en caliente, para la evaluación de los parámetros físico-mecánicos, está definida por la naturaleza de los materiales utilizados. Estos son desechos de madera (aserrín) y polietileno de alta densidad de reciclado primario, así como, de las condiciones de proceso.

Para el presente estudio se manufacturaron probetas, recurriendo al equipo instalado en la Sección de Tecnología de la Madera del CII. Se fabricaron un total de 36 probetas de madera plástica, cuyas formulaciones fueron de 30, 40 y 50 % en peso de residuos de aserrín, cuyo tamaño de partícula pasa en tamiz 40 y es retenido en un tamiz 60, el polímero utilizado fue polietileno de alta densidad.

Las mezclas obtenidas se calentaron en un horno hasta alcanzar una temperatura de 190 °C variando el tiempo de residencia en 55, 65 y 75 minutos. Luego fueron sometidas a compresión en caliente a una temperatura aplicando una presión de compresión de 10 toneladas.

Posteriormente las probetas fueron sometidas a pruebas físico-mecánicas las cuales fueron, densidad, resistencia a la ruptura, temperatura de inflamación, dureza Janka y porcentaje de humedad. Se utilizaron procedimientos y regulaciones de ASTM.

En la figura 9, 10 y 11 se observa el comportamiento de la densidad respecto la variación de tiempo de residencia en el horno a diferentes

composiciones de material. En la figura 9, con una composición de 30 % de aserrín y 70 % de polímero y en la figura 10, con una composición de 40 % de aserrín y 60 % de polímero.

Se puede observar un aumento de densidad directamente proporcional al tiempo de residencia en el horno. Dicho comportamiento obedece a variaciones en el volumen dado que la masa debe mantenerse constante. Esto al permanecer más tiempo en el horno, el polímero alcanza una mayor plasticidad, permitiendo una mejor distribución en los espacios vacíos de la probeta. Ocasionando con ello, una disminución en el volumen aparente total y por lo tanto un incremento en la densidad del material compuesto final.

En la figura 11 se observa un comportamiento diferente al presentado en las dos gráficas anteriores. Dicha gráfica muestra disminución de la densidad respecto al tiempo de residencia en el horno comprendido entre 55 y 65 minutos luego para tiempos entre 65 y 75 minutos se observa un aumento en la densidad.

Este comportamiento se le puede atribuir a la diferencia de densidades de los materiales originales. Es debido a la movilidad diferencial de las partículas provocando segregación de los componentes de la mezcla, disminuyendo la estabilidad de la mezcla. Así también como la influencia sobre la formulación ya que aun cuando tienen proporción de mezcla equivalente tienen menor capacidad de aglutinar o encapsular las fibras de aserrín, provocando heterogeneidad en las probetas.

Lo anterior indica que para las probetas con composición de 50 % aserrín 50 % polímero se alcanza una mejor homogenización. Esto a partir de los 65

minutos tiempo por debajo del cual el fenómeno de la segregación de sólidos es más evidente.

En las figuras 12, 13 y 14 se evaluó la fuerza de ruptura respecto al tiempo de residencia en el horno. Se puede observar que para las diferentes composiciones de las probetas se presenta un mismo comportamiento, donde la dureza máxima del material respecto al tiempo se registra aproximadamente a una temperatura entre 65 °C y 75 °C. Obteniendo así una resistencia a la ruptura máxima entre las tres formulaciones de 1 003,89 Newton correspondiente a la formulación con 30 % aserrín y 70 % polímero para un tiempo de residencia en el horno de 65 minutos.

Mientras que para una composición de 40 % aserrín y 60 % polímero se obtuvo una dureza máxima de 582,06 Newton con un tiempo de residencia en el horno de 75 minutos. Para una composición de 50 % de aserrín y 50 % polímero se obtuvo una dureza máxima de 222,36 Newton para una temperatura de residencia en el horno de 65 minutos.

La resistencia a la ruptura disminuyó considerablemente a medida que la formulación aumentaba en proporción del aserrín, denotando un debilitamiento en la resistencia del material. Esto debido a la mayor dispersión del polímero generando una heterogeneidad de la probeta. Además se observa que a medida que el tiempo de residencia de horneado aumenta a un tiempo aproximado de 70 minutos se presenta un punto de inflexión en el comportamiento de las gráficas donde se presenta una disminución en la resistencia a la ruptura. Esto debido a una mejor dispersión del polímero en la mezcla, lo que a su vez confiere mucho mayor rigidez en la probeta resultante, disminuyendo las capacidades mecánicas del material compuesto.

En la figura 15, 16 y 17 se muestran los resultados de la evaluación de la temperatura de inflamabilidad en función de la variación del tiempo de residencia en el horno. El máximo valor de temperatura de inflamabilidad fue de 600 °C y se registró para una formulación con una composición de 30 % de aserrín y 70 % de polietileno para un tiempo de residencia en el horno de 65 minutos.

Se observó un comportamiento similar para la formulación de 50 % de aserrín y 50 % de polímero aunque con valores de temperatura menores que en el caso anterior. Como se puede observar en la figura 16, el comportamiento de la temperatura de inflamabilidad observado para las probetas con formulación de 40 % de aserrín y 60 % de polímero es diferente al de las otras formulaciones.

En la gráfica mencionada se puede observar que no se presenta un valor máximo sino que la tendencia indica un aumento en la propiedad analizada. Esto indica que para alcanzar un valor máximo se necesita mayor tiempo de residencia en el horno que los 75 minutos que se evaluaron. Se evidenció que a medida que la proporción del polímero es mayor, este tiene mayor temperatura de inflamabilidad.

En la figura 18, 19 y 20 se evaluó la incidencia de la dureza Janka, respecto a la variación del tiempo de residencia en el horno. Esto para distintas formulaciones, una de 30 % de aserrín y 70 % la dureza Janka fue directamente proporcional al tiempo de residencia en el horno, teniendo un máximo de dureza de 2,687 grados Janka. Mientras que para una composición de 40 % de aserrín y 60 % de polímero los grados Janka máximos alcanzados fue de 2,426.5 grados Janka.

Para la formulación de 50 % de aserrín y 50 % de polímero su máxima dureza Janka fue de 3,083 grados Janka. Por consiguiente la dureza Janka registra un aumento promedio a medida que se adicionó más aserrín a la formulación, evidenciando un aumento a la resistencia a penetración del material. Esto debido a la mayor presencia de aserrín en la formulación y por lo tanto confiriéndole mayor elasticidad a la probeta.

En la figura 21, 22 y 23 se muestran los resultados obtenidos respecto a el valor de la humedad en función del tiempo de residencia en el horno. Esto para las distintas composiciones de las probetas, en la formulación de 30 % de aserrín y 70 % de polímero el comportamiento de la propiedad fue inversamente proporcional al aumento del tiempo de residencia en el horno. Esto se le atribuye distribución uniforme del polímero y debida homogenización y capacidad para ocupar espacios vacios donde pueda contribuir a la acumulación de humedad en los mismos.

Mientras que para las figuras 22 y 23 para las formulaciones de 40 % de aserrín y 60 % de polímero y la formulación de 50 % de aserrín y 50 % de polímero presentan un comportamiento similar. Aumenta la humedad a una temperatura de residencia en el horno de 65 °C y posteriormente disminuye para una temperatura de 75 °C. Este tipo de comportamiento se le puede atribuir a la mayor presencia de aserrín en la mezcla ocasionando una mayor absorción de la humedad.

Mediante el análisis de varianza realizado se determinó que no hay influencia significativa de la variación de la formulación y de la variación del tiempo de residencia, en el horno sobre el valor de la densidad de las probetas. En cuanto a la fuerza de ruptura se estableció influencia de la formulación y el tiempo de residencia en el horno, concuerda con lo observado a nivel

experimental. A mayor cantidad de polímero en la mezcla y mayor tiempo de residencia en el horno mayor fue la resistencia a la ruptura registrada. Por otra parte, se determinó que no hay influencia de las variables de proceso tiempo de residencia en el horno y formulación de probeta sobre la temperatura de infamación.

CONCLUSIONES

1. La formulación con mejores propiedades fisicomecánicas es la que contiene 30 % de aserrín y 70 % de polímero, sean estas densidad, resistencia a la ruptura, dureza.
2. La temperatura de procesamiento que aglutina el polímero a la madera es de 190 °C.
3. A medida que el material permanece mayor tiempo de residencia en el horno tiene mejores propiedades fisicomecánicas.
4. La presión de precompresión adecuada es de 10 toneladas.
5. La formulación tiene efectos significativos en la densidad del material compuesto.
6. La formulación y tiempo de residencia en el horno tiene efectos significativos en la ruptura del material.
7. La formulación tiene efectos significativos en la temperatura de inflamabilidad.
8. No existe diferencia significativa en las propiedades de la madera plástica, para los parámetros de densidad e inflamabilidad. Mientras que para fuerza de ruptura y Janka si hay diferencia significativa.

RECOMENDACIONES

1. Realizar un estudio sobre la influencia de la segregación de sólidos, entre aserrín y polietileno de alta densidad que se someten a una precompresión en caliente.
2. Elaborar un estudio de desechos de madera respecto a su comportamiento en sus propiedades fisicomecánicas como un material compuesto para trabajar bajo esfuerzos de compresión.
3. Desarrollar una caracterización del material individual para predecir posibles causas y efectos que pueden surgir a la formación del material compuesto.
4. Verificar si la elaboración de madera plástica elaborada de polietileno de alta densidad y desechos de aserrín puede aplicarse en la industria para la elaboración de materiales.
5. Ejecutar un estudio comparativo para evaluar el uso de la madera plástica con la madera convencional y determinar si se podría utilizar como un sustituto.

BIBLIOGRAFÍA

1. ANATOLE A., Klyosov. *Wood-plastic composites*. New Jersey: Wiley. Hoboken, 2007. 190 p.
2. AYRES, Gilbert H. *Análisis químico cuantitativo*. 2a ed. México: Harla 1970. 350 p.
3. BELTRAN, Maribel; y MARCILLA, Antonio. *Bases del proceso de Polímeros*. Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Alicante. 276 p.
4. BUXÓ, Ramon; PIQUÉ, Raquel. *ASTM D143 – 09 Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. Section 12: Hardness (Janka). Section 13: (Compression Perpendicular to Grain)*. España: Grupo planeta, 2008. 268 p.
5. _____. *ASTM D1929 – 12 Standard test methods for determining ignition temperature of plastics*. España: Grupo Planeta, 2008. 268 p.
6. _____. *ASTM D2395 - 07ae1 Standard Test Methods for Specific Gravity of Wood and Wood-Based Materials*. España: Grupo Planeta, 2008. 268 p.

7. _____. *ASTM D4442 – 07 Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-Base Materials*. España: Grupo Planeta, 2008. 268 p.
8. CERVANTES, Luis; ORTEGA, Alberto; GARZA, Rolando. *Compósitos de Madera Plástica*. México: CIDECI, 2006. 346 p.
9. GAMBA ÁLVAREZ, Oswald. *Plan de negocios para el diseño de artículos fabricados en madera plástica para la industria de la construcción*. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, Noviembre 2008. 384 p.
10. HARPER, Charles A. *Manual del plástico tomo 1*. México: McGraw Hill, 2004. 950 p.
11. HATCH, Mark Christopher. *Cessing, mechanical, and environmental performance of engineering polymer wood-plastic composites*. Department of Civil and Environmental Engineering. Washington State University. Agosto 2008. 325 p.
12. HIETALA, Maiju. *Extrusion Processing of Wood Raw Materials for Use in Wood-Polymer Composites*. Department of Engineering Sciences and Mathematics Division of wood and Bionanocomposites. University of Oulu, Finland. Abril 2011. 387 p.
13. KIKUCHI, Takeyasu. *The Technology for Manufacturing Wood Filled Plastic with Superior Properties to Natural Wood, and the Market thereto*. 1st. International Wood Composites Symposium in Kassel/Germany. 1998. 411 p.

14. KIRK, Raymond E.; Donald F. Othmer, *Enciclopedia de tecnología Química tomo 13*. México: Hispanoamericana, 1963. 2 190 p.
15. LI, Yongfeng, *Wood-Polymer composites*. Laboratory of Bio-based material science and technology of ministry of education. Northeast Forestry University, P. R. China. 478 p.
16. LUCANA, Masías; DANTE, Ítalo. *Diseño de un molde para la fabricación de probetas de materiales compuestos de matriz plástica y refuerzos de fibras naturales mediante compresión térmica*. Tesis. Facultad de Ciencias e Ingeniería. Pontificia Universidad Católica del Perú, Mayo 2008. 245 p.
17. MARTINEZ LOPEZ, Yonny. *Prospectivas para la utilización del aserrín en la producción de tableros de madera plástica con propiedades ignífugas*. CITMA; Ciencia Tecnología y Medio Ambiente abril-julio 2012. 215 p.
18. MCCABE, Warren. *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. 4a ed. Mexico: McGraw Hill. 1992. 1 168 p.
19. MINK, W. *El plástico en la industria: tratado practico tomo 1*. México: Gustavo Gilli, 1990. 540 p.
20. ROCA GIRÓN, Iván. *Estudio de las propiedades y aplicaciones industriales del polietileno de alta densidad (PEAD)*. Trabajo de graduación Ingeniería Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2005. 256 p.

21. SAMPIERI, Roberto. *Metodología de la investigación*. 4a ed. Colombia: McGraw Hill. 2003. 287 p.
22. SOLÍS JARA, Mario; LISPERGUER MUÑOZ, Justo. *Compuestos mixtos a base de plásticos y madera (Wood-Polymer composites)*. Universidad del Bío-Bío, Departamento de Química. Facultad de Ciencias, Chile, 2002. 195 p.
23. TOMOYUKI, Fujii; TE-FU, Qin. *Estudio microscópico de los materiales compuestos de madera y polipropileno*. Informe de investigación del Instituto de Investigación Forestal, China, Marzo 2002. 315 p.

APÉNDICE

Datos calculados

Apéndice 1. **Datos obtenidos para determinar la densidad de las probetas con formulación 30 % de aserrín y 70 % de polietileno de baja densidad**

TIEMPO DE HORNEADO [mín.]	Probeta Núm.	Ancho final (cm)	Longitud (cm)	Espesor final (cm)	volumen (cm³)	Masa (g)
55	111	4,617	9,199	1,075	45,675	42,950
	112	4,511	9,227	1,108	46,115	41,620
	113	4,407	9,147	1,019	41,060	41,470
65	121	4,394	8,8	0,984	38,051	37,890
	122	4,710	9,077	1,006	42,992	42,540
	123	4,727	8,953	1,025	43,396	41,830
75	131	4,523	9,365	1,014	42,965	39,200
	132	4,347	9,089	0,971	38,380	42,960
	133	4,562	9,145	1,008	42,056	40,120

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Datos obtenidos para determinar la densidad de las probetas con formulación 40 % de aserrín y 60 % de polietileno de baja densidad**

TIEMPO DE HORNEADO [mín]	Probeta Núm.	Ancho final (cm)	Longitud (cm)	Espesor final (cm)	volumen (cm³)	Masa (g)
55	211	4,607	9,198	1,095	46,418	38,430
	212	4,720	8,99	1,033	43,847	37,810
	213	4,706	9,245	1,224	53,271	40,370
65	221	4,643	9,062	1,155	48,586	39,440
	222	4,762	8,625	1,088	44,687	42,530
	223	4,722	9,036	1,185	50,579	40,770
75	231	4,376	9,219	1,211	48,845	49,120
	232	4,852	9,351	1,075	48,789	39,680
	233	4,687	8,329	1,032	40,297	38,120

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Datos obtenidos para determinar la densidad de las probetas con formulación 50 % de aserrín y 50 % de polietileno de baja densidad**

TIEMPO DE HORNEADO [mín]	Probeta Núm.	Ancho Final (cm)	Longitud (cm)	Espesor Final (cm)	volumen (cm³)	Masa (g)
55	311	4,607	9,198	1,095	46,418	38,800
	312	4,720	8,99	1,033	43,847	41,180
	313	4,706	9,245	1,224	53,271	38,580
65	321	4,643	9,062	1,155	48,586	39,960
	322	4,762	8,625	1,088	44,687	39,910
	323	4,722	9,036	1,185	50,579	38,920
75	331	4,376	9,219	1,211	48,845	38,350
	332	4,852	9,351	1,075	48,789	42,660
	333	4,687	8,329	1,032	40,297	35,980

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **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 HORNEADO [mín]	Probeta Núm.	Fuerza (kg)	Newton (N)
55	111	35,000	343,350
	112	36,000	353,160
	113	38,000	372,780
65	121	35,000	343,350
	122	104,000	1 020,240
	123	168,000	1 648,080
75	131	78,000	765,180
	132	125,000	1 226,250
	133	102,000	1 000,620

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **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 HORNEADO [mín.]	Probeta Núm.	Fuerza (kg)	Newton (N)
55	211	26,000	255,060
	212	14,000	137,340
	213	28,000	274,680
65	221	60,000	588,600
	222	52,000	510,120
	223	56,000	549,360
75	231	50,000	490,500
	232	62,000	608,220
	233	66,000	647,460

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **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 HORNEADO [mín.]	Probeta Núm.	Fuerza (kg)	Newton (N)
55	311	13,000	127,530
	312	4,000	39,240
	313	8,000	78,480
65	321	26,000	255,060
	322	14,000	137,340
	323	28,000	274,680
75	331	8,000	78,480
	332	32,000	313,920
	333	22,000	215,820

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Temperatura de inflamación para las probetas con formulación 30 % de aserrín 70 % de polietileno reciclado de baja densidad**

Tiempo de horneado [mín.]	Probeta Núm.	Temperatura de Inflamabilidad [°C]
55	111	550
	112	580
	113	580
65	121	580
	122	600
	123	620
75	131	560
	132	600
	133	610

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. **Temperatura de inflamación para las probetas con formulación 40 % de aserrín 60 % de polietileno reciclado de baja densidad**

Tiempo de horneado [mín]	Probeta Núm.	Temperatura de Inflamabilidad [°C]
55	211	325
	212	330
	213	360
65	221	355
	222	320
	223	350
75	231	350
	232	340
	233	360

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Temperatura de inflamación para las probetas con formulación 50 % de aserrín 50 % de polietileno reciclado de baja densidad**

Tiempo de horneado [mín.]	Probeta Núm.	Temperatura de Inflamabilidad [°C]
55	311	290
	312	280
	313	290
65	321	290
	322	290
	323	299
75	331	290
	332	280
	333	298

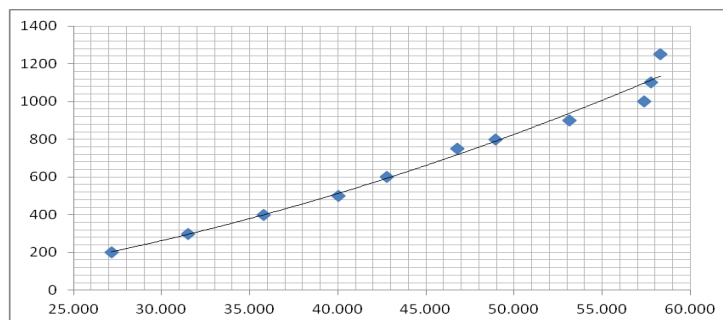
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. **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**

Tiempo (min)	Probeta Núm.	PSI	Fuerza [N]	Altura (mm)	Penetración (%)
55	111	200	0,262	8,020	27,157
		300	0,393	7,540	31,517
		400	0,524	7,070	35,786
		500	0,655	6,600	40,054
		600	0,786	6,300	42,779
		750	0,983	5,860	46,776
		800	1,048	5,620	48,955
		900	1,179	5,160	53,134
		1000	1,311	4,690	57,402
		1100	1,442	4,650	57,766

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. **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**



Fuente: datos calculados, tabla X.

Ecuación	Coefficiente de correlación R ²	Altura (%)	Dureza Janka (kN)
$F = 0,3182\%A^2 + 2,6976\%A - 104,38$	0,98	50	1,083

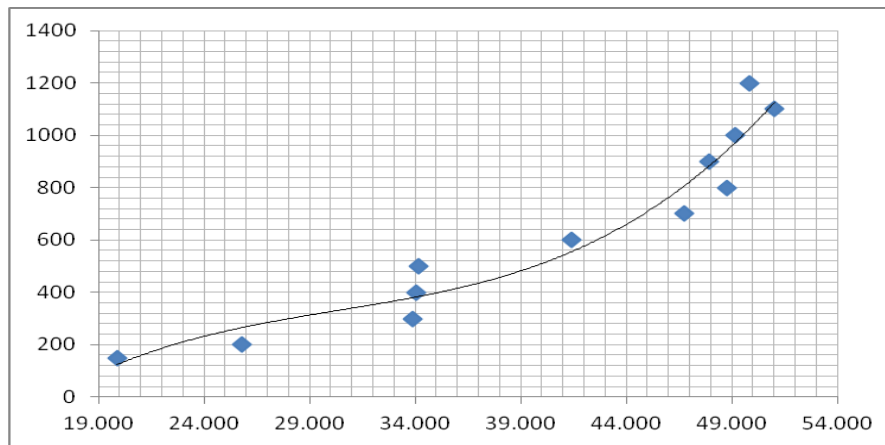
[Ec. 1]

Apéndice 12. **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**

Tiempo (min)	Probeta Núm.	PSI	Fuerza [N]	Altura (mm)	Penetración (%)
65	113	150	0,1966	8,82	19,891
		200	0,2621	8,17	25,795
		300	0,3932	7,28	33,878
		400	0,5242	7,26	34,060
		500	0,6553	7,25	34,151
		600	0,7863	6,45	41,417
		700	0,9174	5,86	46,776
		800	1,0484	5,64	48,774
		900	1,1795	5,73	47,956
		1 000	1,3105	5,6	49,137
		1 100	1,4416	5,39	51,045
		1 200	1,5726	5,52	49,864

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. **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**



Fuente: datos calculados, tabla XI.

ECUACIÓN	Coefficiente de Correlación	Altura (%)	Dureza Janka (kN)
$F = 0,0598\%A^3 - 5,4594\%A^2 + 179,12\%A - 1\ 749,6$	0,93	50	1,330

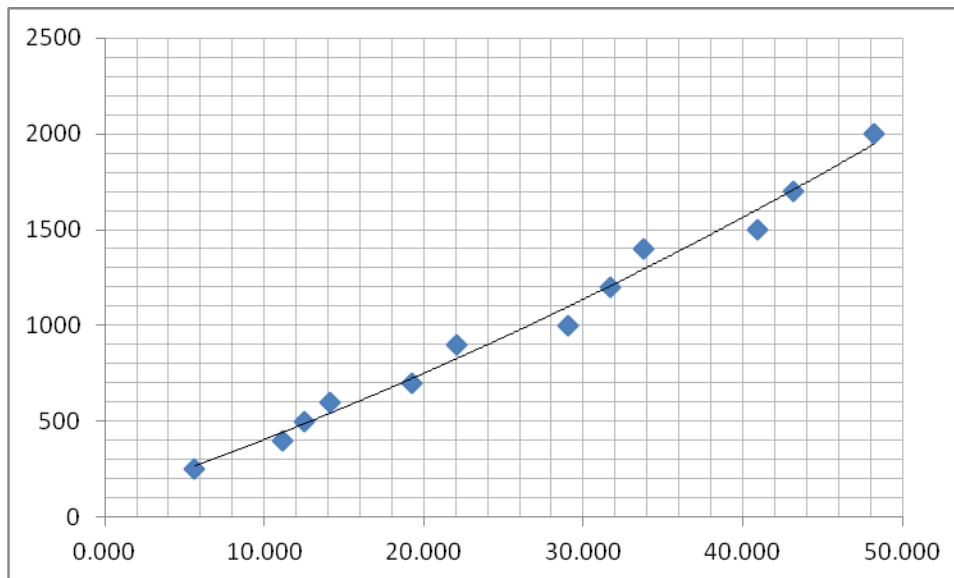
[Ec. 2]

Apéndice 14. **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**

Tiempo (min)	Probeta Núm.	PSI	Fuerza [N]	Altura (mm)	ALTURA Q ENTRO (%)
75	331	250	0,3276	10,39	5,631
		400	0,5242	9,78	11,172
		500	0,6553	9,63	12,534
		600	0,7863	9,46	14,078
		700	0,9174	8,89	19,255
		900	1,1795	8,58	22,071
		1 000	1,3105	7,81	29,064
		1 200	1,5726	7,52	31,698
		1 400	1,8347	7,29	33,787
		1 500	1,9658	6,5	40,963
		1 700	2,2279	6,26	43,143
2 000	2,621	5,7	48,229		

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 15. **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 75 minutos de residencia en el horno**



Fuente: datos calculados, tabla XII.

ECUACIÓN	Coefficiente de correlación R ²	Altura (%)	Dureza Janka (kN)
$F = 0,2039\%A^2 + 28,424\%A + 100,61$	0,99	50	2,688

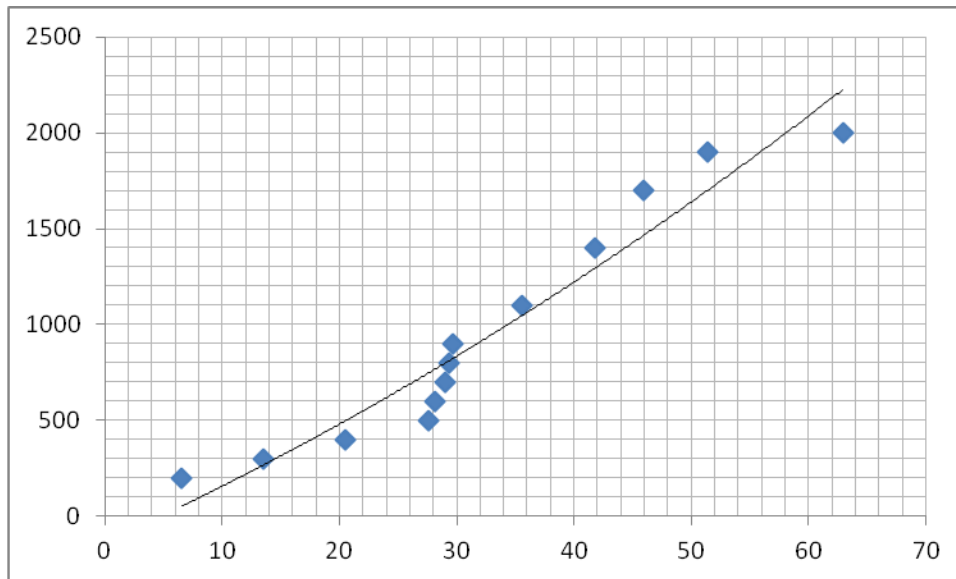
[Ec. 3]

Apéndice 16. **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**

Tiempo (min)	Probeta Núm.	PSI	Fuerza [N]	Altura (mm)	Penetración (%)
55	211	200	0,2621	10,29	6,540
		300	0,3932	9,52	13,533
		400	0,5242	8,75	20,527
		500	0,6553	7,97	27,611
		600	0,7863	7,91	28,156
		700	0,9174	7,82	28,974
		800	1,0484	7,78	29,337
		900	1,1795	7,74	29,700
		1 100	1,4416	7,1	35,513
		1 400	1,8347	6,41	41,780
		1 700	2,2279	5,95	45,958
		1 900	2,49	5,35	51,408
		2 000	2,621	4,08	62,943

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 17. **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**



Fuente: datos calculados, tabla XIII.

ECUACIÓN	Coefficiente de correlación R ²	Altura (%)	Dureza Janka (kN)
$F = 0,1571\%A^2 + 27,634\%A - 134,94$	0,93	50	2,133

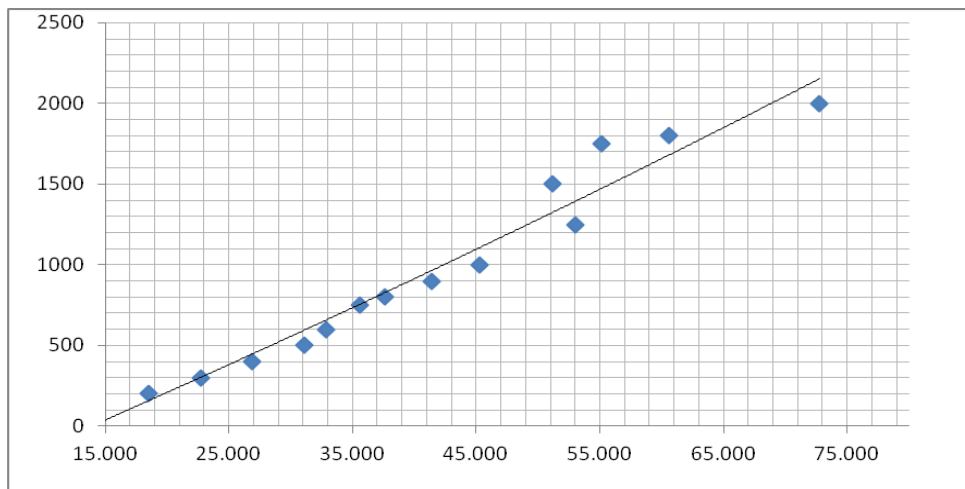
[Ec. 4]

Apéndice 18. **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**

Tiempo (min)	Probeta Núm.	PSI	Fuerza [N]	Altura (mm)	Penetración (%)
65	221	150	0,1966	8,82	19,891
		200	0,2621	8,17	25,795
		300	0,3932	7,28	33,878
		400	0,5242	7,26	34,060
		500	0,6553	7,25	34,151
		600	0,7863	6,45	41,417
		700	0,9174	5,86	46,776
		800	1,0484	5,64	48,774
		900	1,1795	5,73	47,956
		1 000	1,3105	5,6	49,137
		1 100	1,4416	5,39	51,045
		1 200	1,5726	5,52	49,864

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 19. **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**



Fuente: datos calculados, tabla XIV.

ECUACIÓN	Coefficiente de correlación R ²	Altura (%)	Dureza Janka (kN)
$F = 0,0486\%A^2 + 32,36\%A - 458,42$	0,93	50	1,676

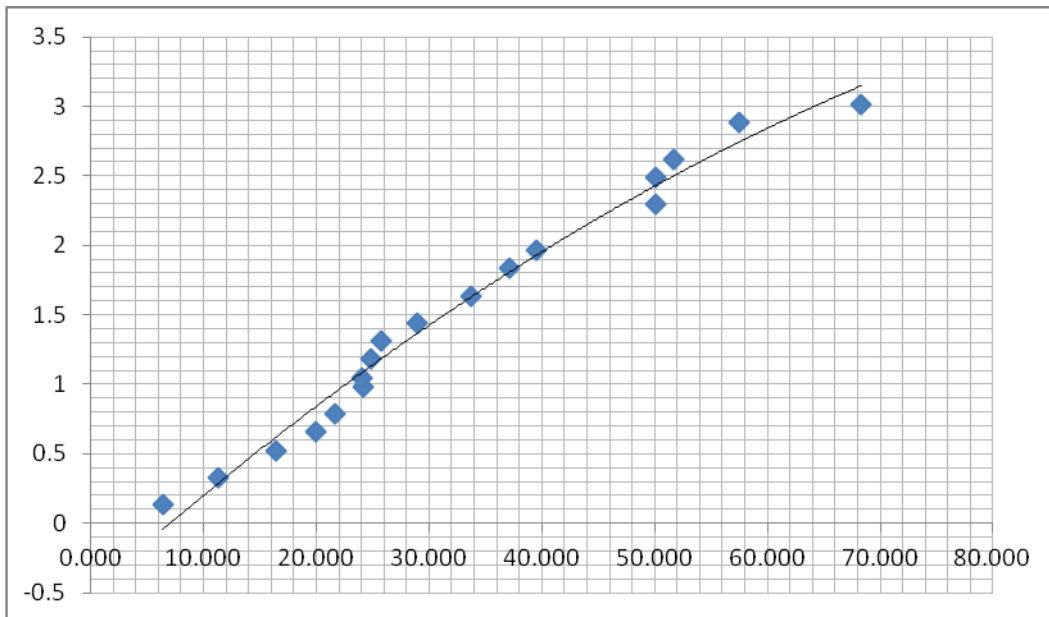
[Ec. 5]

Apéndice 20. **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**

Tiempo (min)	Probeta Núm.	PSI	Fuerza [N]	Altura (mm)	Penetración (%)
75	231	100	0,1311	10,31	6,358
		250	0,3276	9,76	11,353
		400	0,5242	9,2	16,440
		500	0,6553	8,82	19,891
		600	0,7863	8,63	21,617
		750	0,9829	8,35	24,160
		800	1,0484	8,36	24,069
		900	1,1795	8,27	24,886
		1 000	1,3105	8,17	25,795
		1 100	1,4416	7,82	28,974
		1 250	1,6382	7,3	33,697
		1 400	1,8347	6,92	37,148
		1 500	1,9658	6,66	39,510
		1 750	2,2934	5,49	50,136
		1 900	2,49	5,49	50,136
		2 000	2,621	5,32	51,680
		2 200	2,8832	4,68	57,493
2 300	3,0142	3,49	68,302		

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 21. **Fuerza aplicada en función del porcentaje de penetración de las probetas 50 % aserrín y 50 % de polietileno de baja densidad, para la determinación del grado Janka, a un tiempo de 55 minutos de residencia en el horno**



Fuente: datos calculados, tabla XV.

ECUACIÓN	Coefficiente de correlación R ²	Altura (%)	Dureza Janka (kN)
$0,0003\%A^2 + 0,0721\%A - 0,4906$	0,98	50	2,427

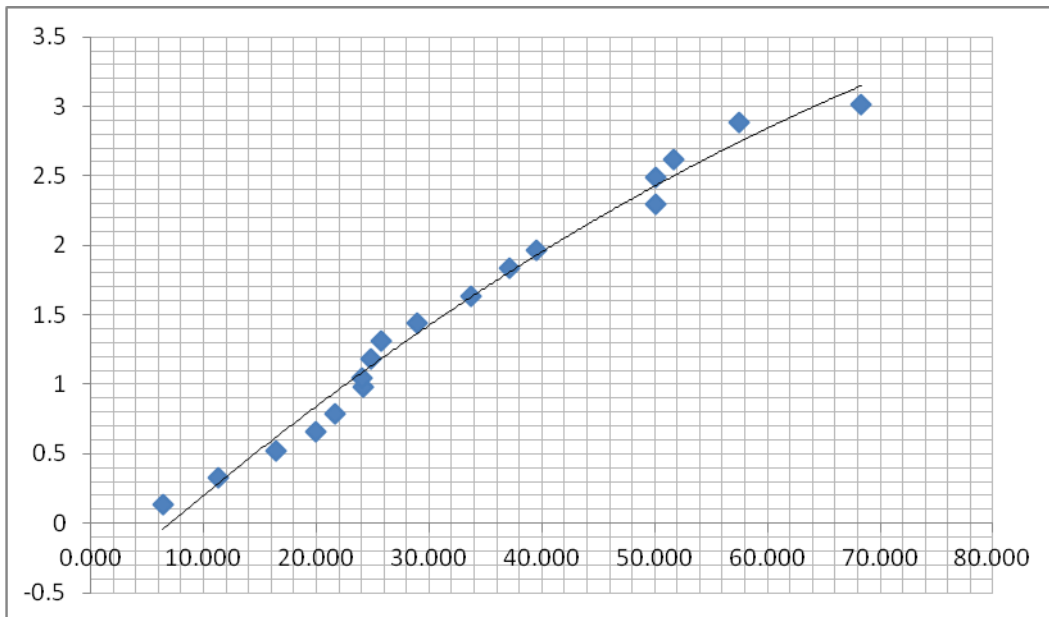
[Ec. 6]

Apéndice 22. **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**

Tiempo (min)	Probeta Núm.	PSI	Fuerza [N]	Altura (mm)	Penetración (%)
55	311	100	0,1311	10,18	7,539
		300	0,3932	8,77	20,345
		400	0,5242	8,07	26,703
		500	0,6553	7,36	33,152
		600	0,7863	6,65	39,600
		750	0,9829	6,19	43,778
		800	1,0484	6,01	45,413
		900	1,1795	5,66	48,592
		1 000	1,3105	5,3	51,862
		1 100	1,4416	5,29	51,953
		1 200	1,5726	5,28	52,044
		1 300	1,7037	4,98	54,768
		1 500	1,9658	4,39	60,127
		1 600	2,0968	3,95	64,124

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 23. **Fuerza aplicada en función del porcentaje de penetración de las probetas 50 % aserrín y 50 % de polietileno de baja densidad, para la determinación del grado Janka, a un tiempo de 65 minutos de residencia en el horno**



Fuente: datos calculados, tabla XVI.

ECUACIÓN	Coefficiente de correlación R^2	Altura (%)	Dureza Janka (kN)
$0,4265\%A^2 - 3,965\%A + 146,72$	0,98	50	1,327

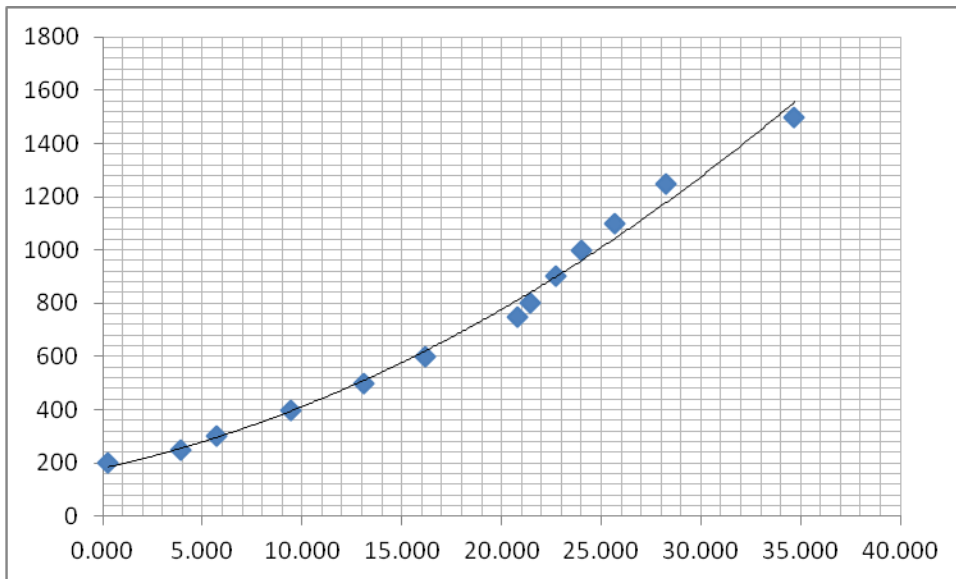
[Ec. 7]

Apéndice 24. **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**

Tiempo (min)	Probeta Núm.	PSI	Fuerza [N]	Altura (mm)	Penetración (%)
65		200	0,2621	10,98	0,272
		250	0,3276	10,58	3,906
		300	0,3932	10,38	5,722
		400	0,5242	9,97	9,446
		500	0,6553	9,57	13,079
		600	0,7863	9,23	16,167
		750	0,9829	8,72	20,799
		800	1,0484	8,65	21,435
		900	1,1795	8,51	22,707
		1 000	1,3105	8,37	23,978
		1 100	1,4416	8,182	25,686
		1 250	1,6382	7,9	28,247
		1 500	1,9658	7,19	34,696

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 25. **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**



Fuente: datos calculados, tabla XIV.

ECUACIÓN	Coefficiente de correlación R ²	Altura (%)	Dureza Janka (kN)
$F = 0,6694\%A^2 + 16,403\%A + 180,83$	0,99	50	3,472

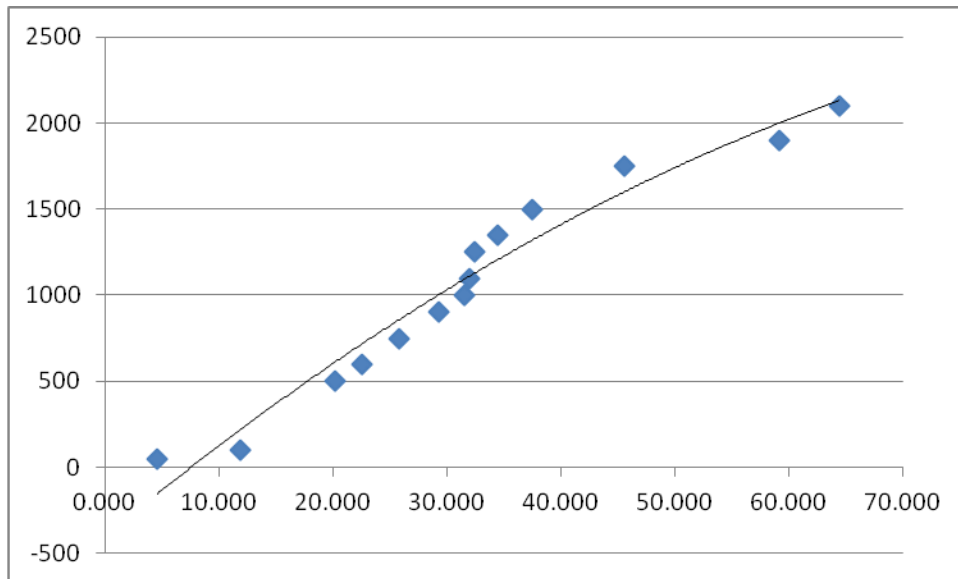
[Ec. 8]

Apéndice 26. **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**

Tiempo (min)	Probeta Núm.	PSI	Fuerza [N]	Altura (cm)	Penetración (%)
75	331	50	0,0655	10,5	4,632
		100	0,1311	9,7	11,898
		500	0,6553	8,78	20,254
		600	0,7863	8,53	22,525
		750	0,9829	8,16	25,886
		900	1,1795	7,78	29,337
		1 000	1,3105	7,53	31,608
		1 100	1,4416	7,49	31,971
		1 250	1,6382	7,43	32,516
		1 350	1,7692	7,21	34,514
		1 500	1,9658	6,88	37,511
		1 750	2,2934	5,99	45,595
		1 900	2,49	4,49	59,219
		2 100	2,7521	3,91	64,487

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 27. **Fuerza aplicada en función del porcentaje de penetración de las probetas 50 % aserrín y 50 % de polietileno de baja densidad, para la determinación del grado Janka, a un tiempo de 75 minutos de residencia en el horno**



Fuente: datos calculados, tabla XVIII.

ECUACIÓN	Coefficiente de correlación R ²	Altura (%)	Dureza Janka (kN)
$F = -0,2455x^2 + 55,104x - 401,93$	0,96	50	3,083

[Ec. 9]

Apéndice 28. **Datos obtenidos del porcentaje de humedad de las probetas con formulación 30 % de aserrín 70 % de polietileno reciclado de baja densidad**

Tiempo (min)	Probeta Núm.	% H
55	112	1,292
65	121	0,714
75	133	0,624

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 29. **Datos obtenidos del porcentaje de humedad de las probetas con formulación 40 % de aserrín 60 % de polietileno reciclado de baja densidad**

Tiempo (min)	Probeta Núm.	% M
55	221	0,635
65	223	1,386
75	231	1,193

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 30. **Datos obtenidos del porcentaje de humedad de las probetas con formulación 50 % de aserrín 50 % de polietileno reciclado de baja densidad**

Tiempo (min)	Probeta Núm.	% M
55	312	1,045
65	322	2,622
75	332	1,575

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 31. **Datos análisis de varianza para prueba de densidad**

Tiempo	Densidad (σ)			TOTAL
	Formulación (%)			
	30/70	40/60	50/50	
40	1 069,29	667,08	245,25	1 981,62
50	3 011,67	1 648,08	372,78	5 032,53
60	2 992,05	1 746,18	470,88	5 209,11
TOTAL	7 073,01	4 061,34	1 088,91	12 223,26

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 32. **Datos análisis de varianza para prueba de fuerza de ruptura**

Tiempo	Fuerza (N)			TOTAL
	Formulación (%)			
	30/70	40/60	50/50	
40	2 852,857	2 448,044	2 499,271	7 800,172
50	2 949,160	2 569,557	2 485,854	8 004,571
60	2 985,656	2 764,898	2 439,793	8 190,347
TOTAL	8 787,673	7 782,499	7 424,918	23 995,090

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 33. **Datos análisis de varianza para prueba de temperatura de inflamación**

Tiempo	Temperatura Inflamación (°C)			TOTAL
	Formulación (%)			
	30/70	40/60	50/50	
40	1 710	1 015	860	3 585
50	1 800	1 025	860	3 685
60	1 770	1 050	870	3 690
TOTAL	5 280	3 090	2 590	10 960

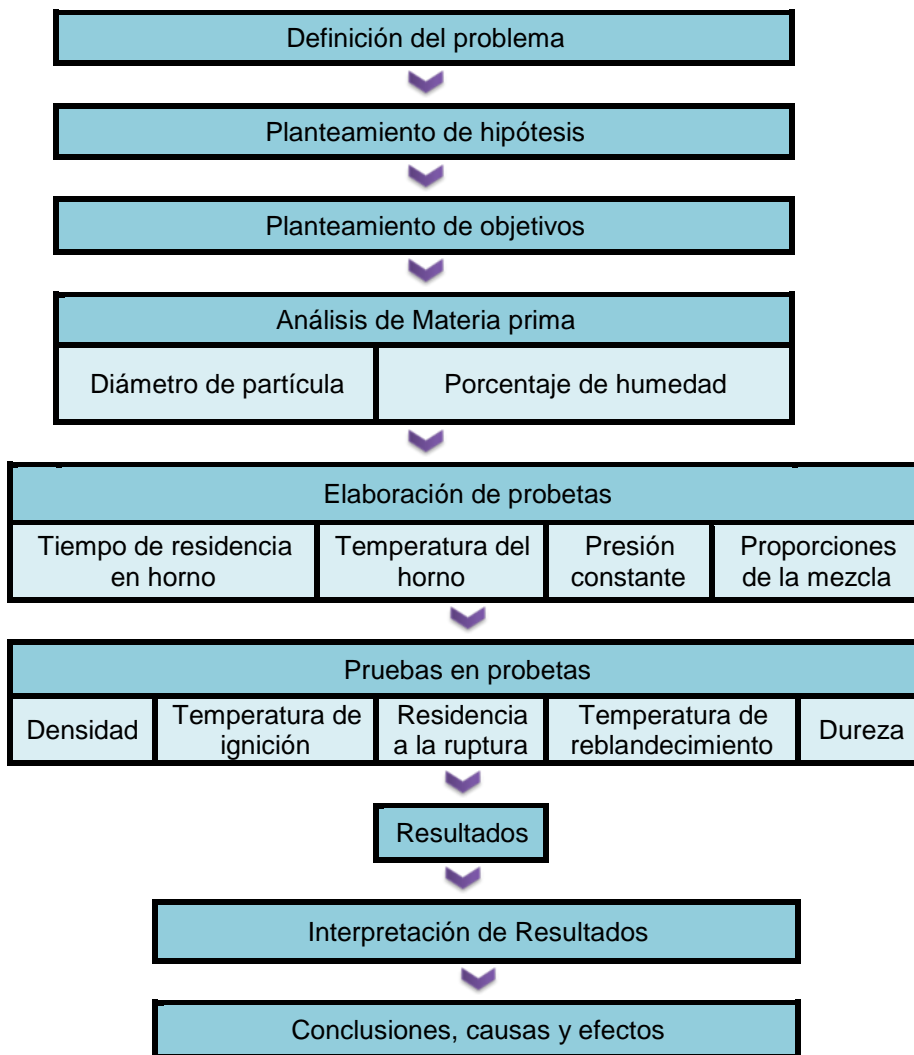
Fuente: elaboración propia.

Análisis Cuantitativo

El lineamiento de esta investigación, es de carácter experimental de técnica cuantitativa, se harán mediciones, recolección y análisis de datos para

evaluar el efecto de los resultados sobre las hipótesis planteadas y la interpretación de los resultados sobre los objetivos a evaluar y así concluir sobre las causas y efectos del mismo.

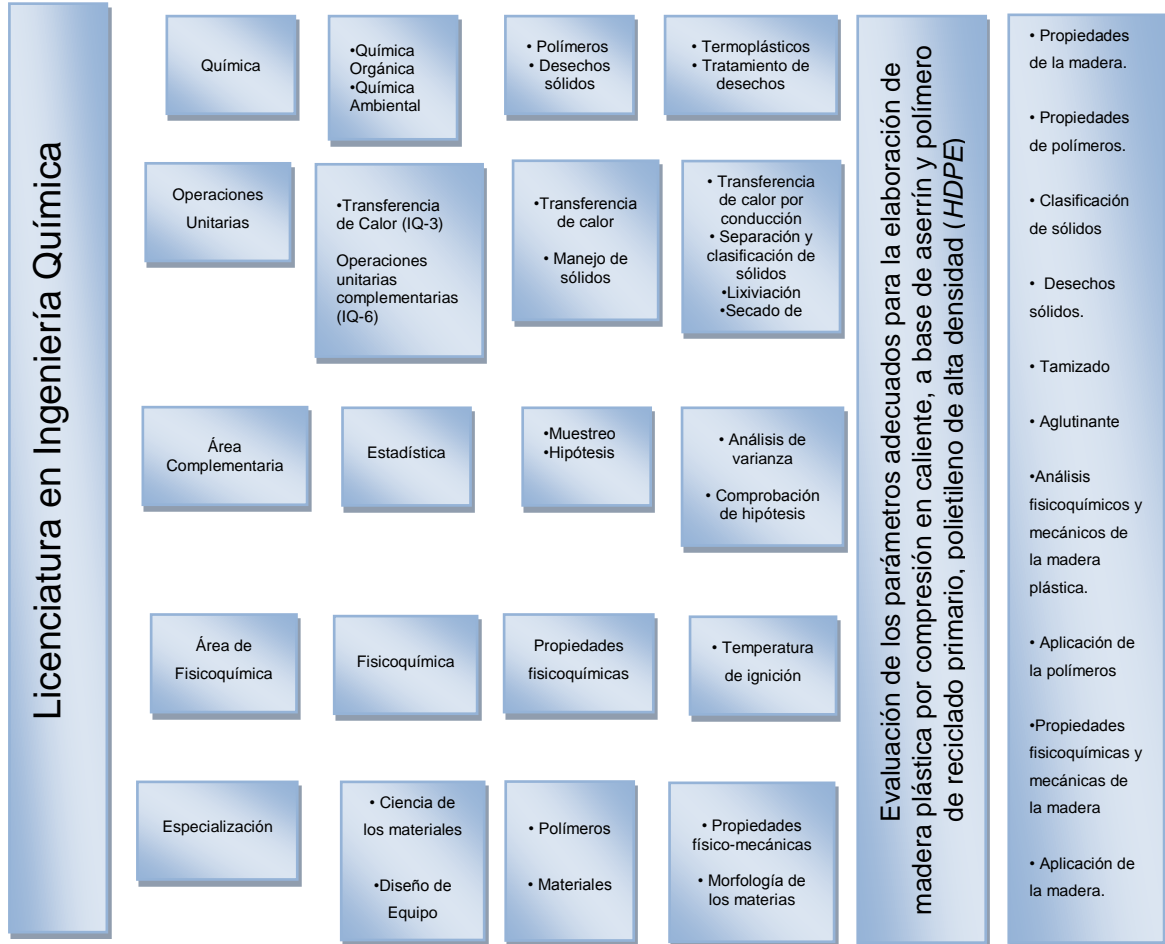
Apéndice 34. Análisis cuantitativo



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio 2010.

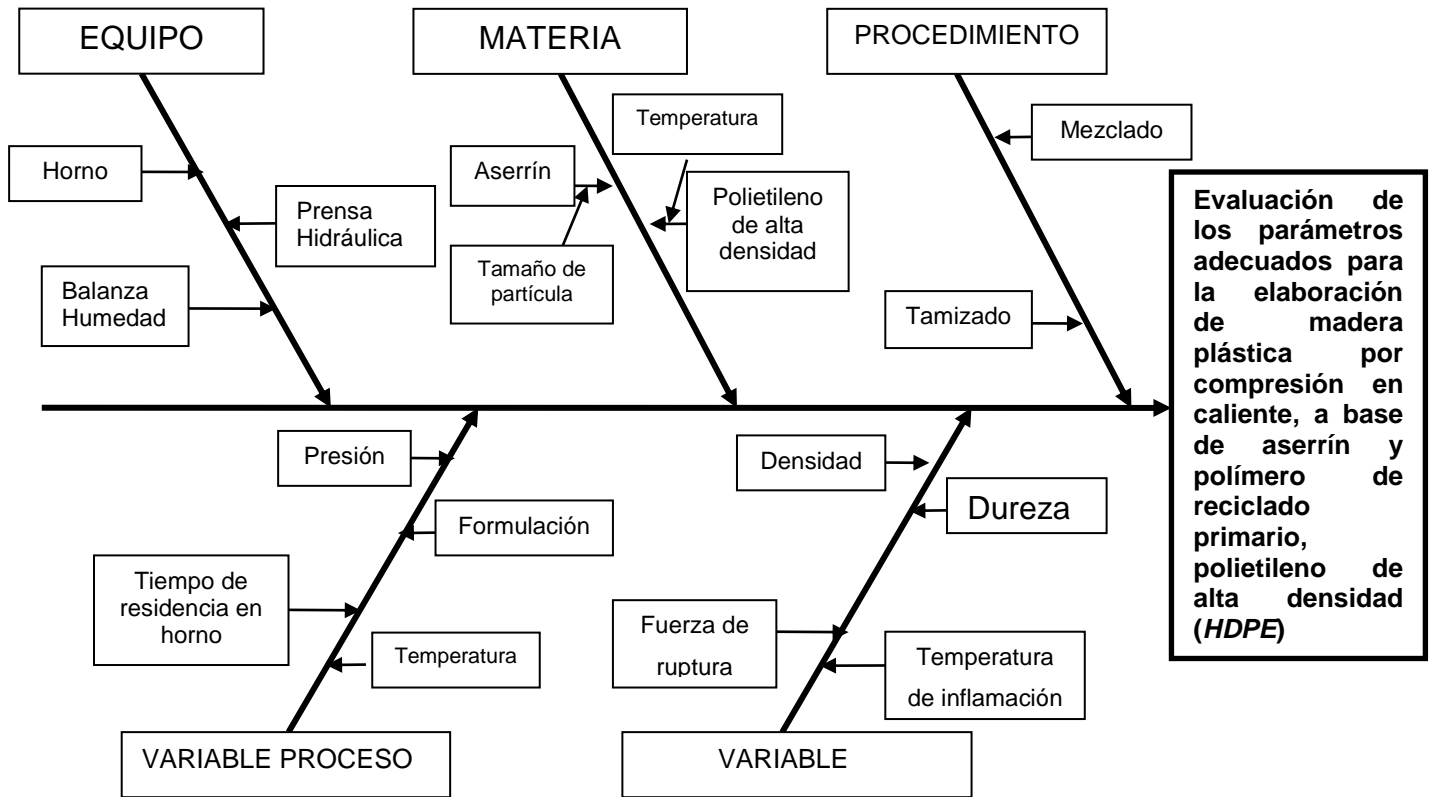
Apéndice 35. **Tabla de requisitos académicos**

1er. Paso	2do. Paso	3er. Paso	4to. Paso	5to. Paso	6to. Paso	7mo. Paso
Carrera	Área	Tema Genérico	Tema Específico	Especificación	Problema a resolver	Temario tentativo



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio 2010.

Apéndice 36. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio 2010.