



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

**DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ADECUADOS PARA LA ELABORACIÓN DE
MADERA PLÁSTICA POR COMPRESIÓN EN CALIENTE DE MEZCLAS DE DESECHOS DE
MADERA TECA (*Tectona grandis*) REDUCIDOS A ASERRÍN Y POLIPROPILENO**

Mauricio Valentino Rivera Tello

Asesorado por el Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus

Guatemala, febrero de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ADECUADOS PARA LA ELABORACIÓN DE
MADERA PLÁSTICA POR COMPRESIÓN EN CALIENTE DE MEZCLAS DE DESECHOS DE
MADERA TECA (*Tectona grandis*) REDUCIDOS A ASERRÍN Y POLIPROPILENO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MAURICIO VALENTINO RIVERA TELLO

ASESORADO POR EL ING. JORGE EMILIO GODÍNEZ LEMUS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, FEBRERO DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

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

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADORA	Inga. Casta Petrona Zeceña Zeceña
EXAMINADOR	Ing. José Manuel Tay Oroxom
EXAMINADOR	Ing. Renato Giovanni Ponciano Sandoval
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:

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ADECUADOS PARA LA ELABORACIÓN DE MADERA PLÁSTICA POR COMPRESIÓN EN CALIENTE DE MEZCLAS DE DESECHOS DE MADERA TECA (*Tectona grandis*) REDUCIDOS A ASERRÍN Y POLIPROPILENO

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



Mauricio Valentino Rivera Tello



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Guatemala 18 de noviembre del 2013,

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

Ingeniero Monzón:

Por este medio informo a usted que he revisado el informe final del trabajo de graduación **"DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ADECUADOS PARA LA ELABORACIÓN DE MADERA PLÁSTICA POR COMPRESIÓN EN CALIENTE DE MEZCLAS DE DESECHOS DE MADERA TECA (*Tectona grandis*) REDUCIDOS A ASERRÍN Y POLIPROPILENO"** elaborado por el estudiante **Mauricio Valentino Rivera Tello**, quien se identifica con el carne No. **200018530**, el cual he encontrado satisfactorio.

Atentamente.

Ing. Jorge Emilio Godínez
Asesor del Trabajo de Graduación

Ing. Jorge Emilio Godínez Lentos
INGENIERO QUÍMICO
Colegiado 874





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Guatemala, 19 de noviembre de 2013
Ref. EI.Q.TG-IF.081.2013

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

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el Acta TG-**044**-2013-IF 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: **Mauricio Valentino Rivera Tello.**

Identificado con número de carné: **2000-18530.**

Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO.**

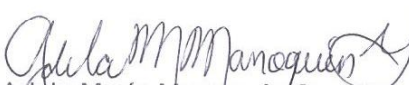
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ADECUADOS PARA LA ELABORACIÓN DE MADERA PLÁSTICA POR COMPRESIÓN EN CALIENTE DE MEZCLAS DE DESECHOS DE MADERA TECA (*Tectona grandis*) REDUCIDOS A ASERRÍN Y POLIPROPILENO

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

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. Adela María Marroquín/González
COORDINADORA DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
ACREDITADO POR
Agencia Centroamericana de Acreditación de
Programas de Arquitectura y de Ingeniería
Período 2009 - 2015





Ref.EIQ.TG.010.2014

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **MAURICIO VALENTINO RIVERA TELLO** titulado: "**DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ADECUADOS PARA LA ELABORACIÓN DE MADERA PLÁSTICA POR COMPRESIÓN EN CALIENTE DE MEZCLAS DE DESECHOS DE MADERA TECA (TECTONA GRANDIS) REDUCIDOS A ASERRÍN Y POLIPROPILENO**". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.



Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, enero 2014

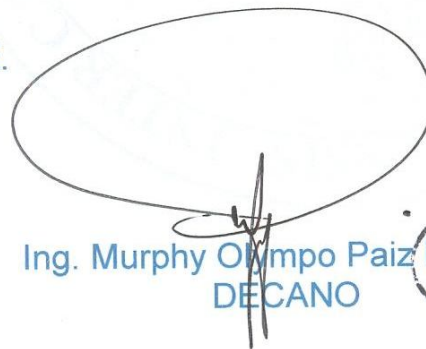
Cc: Archivo
VMMV/ale





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: **DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ADECUADOS PARA LA ELABORACIÓN DE MADERA PLÁSTICA POR COMPRESIÓN EN CALIENTE DE MEZCLAS DE DESECHOS DE MADERA TECA (Tectona Grandis) REDUCIDOS A ASERRÍN Y POLIPROPILENO**, presentado por el estudiante universitario **Mauricio Valentino Rivera Tello**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Murphy Olimpo Paiz Ramos
DECANO



Guatemala, febrero de 2014

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios Por ser mí ancla ante el tormentoso mundo.

Mis padres Por darme una vida llena de amor.

Mis hermanos Por su apoyo y compañía.

AGRADECIMIENTOS A:

Mis padres

Por su apoyo y motivación, por permitirme ser como soy.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XV
OBJETIVOS.....	XVII
Hipótesis.....	XVIII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Compuestos de madera plástica	5
2.1.1. Composición	5
2.1.2. Materiales plásticos	6
2.1.3. Madera	6
2.1.4. Aditivos	6
2.2. Termoplásticos	9
2.2.1. Polipropileno	10
2.2.2. Estructura del polipropileno	10
2.2.3. Rango de productos	12
2.2.3.1. Homopolímeros	12
2.2.3.2. Copolímeros de impacto	12
2.2.3.3. Copolímeros random	13
2.2.4. Obtención de polipropileno	13
2.2.5. Características generales	14

2.2.6.	Polipropileno polímero vinílico.....	14
2.2.7.	Propiedades	15
2.2.8.	Aplicaciones	19
2.3.	Madera Teca	19
2.3.1.	Propiedades	20
2.3.2.	Requerimientos	21
2.4.	Propiedades y características de la madera plástica	21
2.4.1.	Propiedades mecánicas	22
2.4.2.	Estabilidad dimensional.....	22
2.4.3.	Durabilidad y envejecimiento.....	22
2.4.4.	Otras propiedades	23
2.5.	Producción	23
2.5.1.	Extrusión	24
2.5.2.	Inyección	25
2.5.3.	Moldeo por compresión	26
	2.5.3.1. Definición del proceso	28
	2.5.3.2. Esquema del proceso.....	29
2.6.	Ventajas y desventajas	29
2.7.	Usos	30
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	33
3.1.	Variables	33
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	33
3.3.	Recursos disponibles	34
	3.3.1. Recurso humano	34
	3.3.2. Infraestructura	34
3.4.	Recursos y materiales disponibles	34
	3.4.1. Materia prima	34

3.4.2.	Equipo para la elaboración de las piezas de madera plástica	35
3.4.3.	Equipo para la determinación de los parámetros a comparar.....	35
3.4.4.	Reactivos y materiales.....	36
3.5.	Técnica cualitativa y cuantitativa	36
3.6.	Recolección de la información.....	40
3.6.1.	Método para la recolección de materia prima	40
3.6.2.	Procedimiento para crear las piezas de madera plástica	42
3.6.3.	Procedimiento para determinar la resistencia a la ruptura	44
3.6.4.	Procedimiento para determinar la temperatura de inflamación de la madera plástica.....	45
3.6.5.	Procedimiento para determinar la densidad de la madera plástica	46
3.6.6.	Procedimiento para determinar la dureza de la madera plástica	47
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	48
3.7.1.	Ordenamiento de la información.....	48
3.7.2.	Procesamiento de la información.....	52
3.7.2.1.	Determinación de la densidad	52
3.7.2.2.	Determinación del esfuerzo máximo de flexión	52
3.8.	Análisis estadístico	53
3.8.1.	Media aritmética	53
3.8.2.	Análisis de variabilidad	54
3.8.3.	Factores experimentales.....	55

3.8.4.	Factores respuesta.....	55
3.9.	Plan de análisis de los resultados	56
3.9.1.	Métodos y modelos de los datos según tipo de variables.....	56
3.9.2.	Programas a utilizar para el análisis de datos.....	61
3.10.	Manejo de los desechos.....	61
4.	RESULTADOS.....	63
4.1.	Caracterización de la materia prima.....	63
4.2.	Propiedades físico-mecánicas de las piezas de madera plástica.....	64
4.2.1.	Densidad	66
4.2.2.	Temperatura de inflamación.....	68
4.2.3.	Dureza.....	70
4.2.4.	Módulo de ruptura	72
4.3.	Variación de las propiedades físico-mecánicas de las piezas de madera plástica.....	74
4.3.1.	Media aritmética de las propiedades físico- mecánicas de las piezas de madera plástica	74
4.3.2.	Rango de las propiedades físico-mecánicas de las piezas de madera plástica	75
4.3.3.	Desviación estándar de las propiedades físico- químicas de las piezas de madera plástica	75
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	77
	CONCLUSIONES.....	81
	RECOMENDACIONES.....	83
	BIBLIOGRAFÍA.....	85

APÉNDICES	89
ANEXOS	105

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Moldeo por compresión.....	26
2.	Molde para una pieza por compresión	28
3.	Análisis cuantitativos	37
4.	Diagrama de flujo del proceso de creación de las piezas de madera plástica.....	39
5.	Balanza de humedad	41
6.	Tamices.....	41
7.	Extractor	42
8.	Horno eléctrico	43
9.	Forma de colocar las piezas de madera plástica	44
10.	Máquina para la resistencia a la ruptura	45
11.	Piezas de madera no exitosas	64
12.	Piezas de madera plásticas elaboradas.....	65
13.	Densidad de las piezas de madera plástica elaboradas a 160 °C.....	66
14.	Densidad de las piezas de madera plástica elaboradas a 180 °C.....	67
15.	Temperatura de inflamación de las piezas de madera plástica elaboradas a 160 °C.....	68
16.	Temperatura de inflamación de las piezas de madera plástica elaboradas a 160 °C.....	69
17.	Dureza de las piezas de madera plástica elaboradas a 160 °C	70
18.	Dureza de las piezas de madera plástica elaboradas a 180 °C	71
19.	Módulo de ruptura de las piezas de madera plástica elaboradas a 160 °C..	72

20.	Módulo de ruptura de las piezas de madera plástica elaboradas a 180 °C.....	73
-----	---	----

TABLAS

I.	Aditivos y sus usos	7
II.	Propiedades eléctricas	16
III.	Propiedades mecánicas	16
IV.	Propiedades físicas	17
V.	Resistencia química.....	17
VI.	Propiedades térmicas	18
VII.	Propiedades de la película de polipropileno	18
VIII.	Contenido de la madera	20
IX.	División de los experimentos en grupos para su comparación.....	38
X.	Escala Mohs de dureza	48
XI.	Creación de las piezas de madera plástica	49
XII.	Resultados de las diferentes pruebas.....	49
XIII.	Cálculo de la media aritmética.....	50
XIV.	Cálculo del rango.....	50
XV.	Cálculo de la varianza	51
XVI.	Cálculo de la desviación estándar	51
XVII.	Comparación de los resultados	58
XVIII.	Caracterización del aserrín de la especie arbórea Teca y el polímero polipropileno	63
XIX.	Pruebas no exitosas	64
XX.	Experimentos realizados exitosamente	65
XXI.	Media aritmética	74
XXII.	Rango.....	75
XXIII.	Desviación estándar	76

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
I	Ancho
C_{max}	Carga máxima
P	Carga o esfuerzo de ruptura
cm²	Centímetros cuadrados
cm³	Centímetros cúbicos
WPC	Compuestos de madera plástica
ρ	Densidad
L	Distancia entre los apoyos
b	Espesor
°C	Grado Celsius
g	Gramos
kg	Kilogramos
m	Masa
\bar{X}	Media aritmética
mm	Milímetro
R	Módulo de ruptura
n	Número de datos
Pa	Pascales
PVC	Policloruro de vinilo
PB	Polibutileno
PS	Poliestireno
PE	Polietileno

HDPE	Polietilenos de alta densidad
LDPE	Polietilenos de baja densidad
PP	Polipropileno
PET	Politereftalato de etileno
%	Porcentaje
UV	Rayos ultravioletas
X_i	Valor de cada corrida
S^2	Varianza de la muestra
V	Volumen
W	Watts

GLOSARIO

Aglutinante	Es una sustancia que se usa para dar soporte en general a una mezcla, una cumple la función de medio y vehículo, pasado un tiempo y tras secar la mezcla se mantienen ambas sustancias estables y adheridas al soporte
Aserrín	Es el desperdicio del proceso de serrado de la madera, como el que se produce en un aserradero.
Carga de compactación	Presión o carga aplicada a un cuerpo para ser compactado.
Celulosa	Es un polisacárido estructural formado por glucosa que forma parte de la pared de las células vegetales su fórmula empírica es $(C_6H_{10}O_5)_n$, con el valor mínimo de $n = 200$.
Densidad	Relación entre la masa y el volumen de un cuerpo.
Dureza	Es la oposición que ofrecen los materiales a alteraciones como la penetración, la abrasión, el rayado, la cortadura.

Espécimen	Muestra o modelo de prueba con características definidas.
Extrusión	Es un proceso utilizado para crear objetos con sección transversal definida y fija. El material se empuja o se extrae a través de un troquel de una sección transversal deseada.
Inyección	Es un procedimiento mediante el cual se hace pasar un líquido o un material viscoso a través de un tubo o un conducto circular para un determinado fin.
Madera	Es un material ortótropo, con distinta elasticidad según la dirección de deformación, encontrado como principal contenido del tronco de un árbol.
Módulo de ruptura	Esfuerzo máximo que puede soportar un espécimen en el ensayo de flexión.
Polímero	Son macromoléculas formadas por la unión de moléculas más pequeñas llamadas monómeros.
Polipropileno	Es el polímero termoplástico parcialmente cristalino que se obtiene de la polimerización del propileno.
Tamaño de partícula	Diámetro promedio de partícula definido.
Tamiz	Malla que retiene y permite el paso de ciertas partículas.

Temperatura de inflamación

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

Termoplástico

Es un plástico que, a temperaturas relativamente altas se vuelve deformable o flexible, se derrite cuando se calienta y se endurece en un estado de transición vítrea cuando se enfría lo suficiente.

Wood Polymer Composites

Compuestos de madera plástica, material que usa como refuerzo plásticos con el fin de reemplazar a la madera en algunas aplicaciones.

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se determinó la factibilidad técnica de utilizar aserrín de la especie forestal Teca (*Tectona grandis*), como fibra natural para crear maderas plásticas utilizando polipropileno virgen como aglutinante por el método de compresión en caliente. Para cumplir con los objetivos se elaboraron piezas de madera plástica en forma de discos, con dimensiones de 4 ½ pulgadas de diámetro y ½ pulgada de grosor, para ello se construyó un molde metálico con tapadera ajustable que permitió variar la presión aplicada sobre las diferentes formulaciones de polipropileno y aserrín de Teca variando también la temperatura, la presión, y el tiempo en el horno para luego realizar un análisis de las propiedades mecánicas.

El experimento empezó con la selección de la materia prima aserrín de la especie arbórea Teca y polipropileno como aglutinante, el aserrín se tamizó y se utilizó el tamaño de partícula escogido entre 0,375 y 0,246 milímetro, que fue lo que paso por el tamiz número 40 y retenido en el tamiz número 60, en seguida se procedió a mezclar en frío con el aglutinante polipropileno a diferentes porcentajes en peso, sometido a diferentes temperaturas y presiones para obtener las piezas de madera plástica.

Las piezas de madera plástica creadas fueron sometidas posteriormente a diferentes pruebas comparando los parámetros seleccionados dureza, densidad, módulo de ruptura y temperatura de inflamación. Con estos resultados se determinó la factibilidad del método y cuales son las mejores formulaciones polipropileno/aserrín así como los parámetros adecuados de fabricación.

OBJETIVOS

General

Determinar los parámetros adecuados para la elaboración de madera plástica por compresión en caliente de mezclas de desechos de madera Teca (*Tectona grandis*) reducidos a aserrín y polipropileno como aglutinante.

Específicos

1. Establecer la formulación adecuada de mezclado, de piezas de madera plástica con partículas de aserrín, pasadas por el tamiz número 40 y retenido por el tamiz número 60 utilizando como aglutinante polipropileno.
2. Establecer el tiempo de residencia de las piezas de madera plástica en el horno eléctrico.
3. Establecer la temperatura de horneado de las piezas de madera plástica.
4. Establecer las propiedades físico-mecánicas de las piezas de madera plástica: densidad, temperatura de inflamación, módulo de ruptura y dureza.

Hipótesis

Es posible utilizar el polipropileno como un agente aglutinante para la producción de madera plástica utilizando como fibra natural el aserrín proveniente de la madera del árbol de Teca (*Tectona grandis*), determinar el porcentaje adecuado de mezcla, y los parámetros adecuados para producirla, tiempo, presión y temperatura en el horno.

- **Hipótesis estadística**

Hipótesis nula

H_0 : no hay diferencias significativas en las propiedades de la madera plástica con la variación del porcentaje de mezclas.

H_0' : no existe diferencia significativa en las propiedades de la madera plástica al variar el tiempo de horneado así como la temperatura y presión de compresión.

$$\mu_1 = \mu_2$$

Hipótesis alternativa

H_a : hay diferencias significativas en las propiedades de la madera plástica con la variación de la composición de la mezcla.

H_a' : existe diferencia significativa en las propiedades de la madera plástica al variar el tiempo de horneado así como la temperatura y presión de compresión.

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

INTRODUCCIÓN

Se conoce como aserrín, al producto de todas las operaciones mecánicas de elaboración de la madera, especialmente del aserrío, y que por lo general no se considera como material primario para la fabricación de pasta debido a su diminuto tamaño, aunque resulta aceptable para la fabricación de tableros y otros procesos.

Un sector que está aprovechando la gran cantidad de residuos orgánicos es el de la madera plástica, usándolos como refuerzo en materiales plásticos con el fin de reemplazar a la madera en algunas aplicaciones estos materiales compuestos reciben el nombre de compuestos de madera plástica o WPC por sus siglas en inglés (*Wood Polímero Composites*) y presentan mayores ventajas respecto a la madera ya que son más baratos y livianos, y tienen una gran resistencia a la humedad y a los ataques de plagas, al tener una mayor estabilidad requieren un menor mantenimiento.

Para la elaboración de la madera plástica existen varios métodos: extrusión, inyección y compresión, el método utilizado para el presente trabajo de investigación es el de compresión y se utilizará como aglutinante el polipropileno virgen y el aserrín proveniente de la madera de Teca (*Tectona grandis*), se plantea la elaboración de piezas de madera plástica con estos dos materiales utilizando un horno para calentar la mezcla y llevarla a temperatura de fusión, de esta manera el termoplástico se fusionará con las fibras de la madera y creará una nueva matriz denominada madera plástica.

1. ANTECEDENTES

La Bakelita inventada en 1909 por Leo H. Baekeland, es uno de los primeros compuestos de madera-plástica al estar formada por finas partículas de madera a las que se añaden resinas de fenol y formaldehído. La gran mayoría de los productos de madera-plástico que se fabrican actualmente incorporan los mismos productos: por un lado materiales plásticos, en este caso termoplásticos, como ser polietilenos de alta densidad (HDPE) y cloruros de polivinilo (PVC) y por otro, madera en forma de polvo.

Esta combinación que no parecía ser muy prometedora, ya que por un lado las fibras de madera son muy cortas, absorben mucha humedad y son menos resistentes que las fibras de vidrio o de carbono; y por otro lado los materiales termoplásticos son más débiles que los termo endurecibles (reblandecen con el calor y se deforman ante los esfuerzos).

Sin embargo, los resultados de la combinación han sido sorprendentes. Estos compuestos, pese a que utilizan materias primas muy baratas y su proceso de fabricación es de bajo nivel tecnológico, tienen un precio final en el mercado superior al de la madera tratada con productos químicos (sin considerar el ciclo de vida, y su durabilidad mayor). El producto se empezó a usar para terrazas exteriores, pero se ha ido abriendo paso en vallas, barandillas, pasamanos y elementos de fachadas.

Los compuestos de madera y plástico se vieron por primera vez en Estados Unidos durante 1960, principalmente en aplicaciones de marcos de ventanas y puertas. La industria de las ventanas y puertas, que tiene

experiencia con materiales de madera, plástico y aluminio, buscó la forma de utilizar materiales más económicos, de allí que el aserrín parecía un material tanto ligero como barato.

El país con mayor producción de este material es Estados Unidos de América, aunque en Europa su investigación y desarrollo ha aumentado en los últimos años, debido a que el uso de este tipo de materiales puede disminuir costos ya que se aprovecha todo el desperdicio de madera y plástico reciclado. La densidad del material se puede controlar por medio de espumantes o por el tipo de proceso.

El principal problema de estos compuestos es la temperatura de proceso que, en general, no debe sobrepasar los 190 grados Celsius otro problema es la humedad de la madera, la cual no es compatible con la mayoría de polímeros y en algunos casos puede originar degradación y pérdida de propiedades físicas por despolimerización.

Los equipos utilizados para extruir este material están comúnmente equipados con husillos dobles para extrusión. Para inyección generalmente la tecnología tiene pocos desarrollos aunque existen procesos altamente tecnificados de extrusión-inyección otros procesos son compresión y termo formado.

El color de la pieza final depende en gran medida del color de la madera y del polímero. El color del compuesto se puede modificar después del proceso con una laca o durante el procesamiento con un concentrado de color que, si es bien diseñado, puede presentar líneas de flujo que asemejan las vetas normales de la madera.

En Guatemala actualmente no existe ningún trabajo de investigación que abarque el tema de maderas plásticas, solamente lo referente a la madera natural abarcando los temas de caracterización, explotación y utilización de diferentes especies arbóreas en las diferentes universidades del país. Existe una tesis de la Universidad de San Carlos de Guatemala de Ingeniería Civil que analiza las propiedades físico-mecánicas de un sustituto para la madera elaborado con plástico reciclado.

A nivel internacional los países latinoamericanos que lideran este campo son los de Suramérica como Colombia y Chile donde se han publicado una gran variedad de trabajos de madera plástica utilizando los termoplásticos con temperaturas de fusión menores a los 190 grados Celsius y utilizando los métodos de extrusión, inyección y compresión y utilizando diferentes aditivos para mejorar sus propiedades.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Compuestos de madera plástica

Los materiales conocidos como maderas plásticas o *Wood Plastic Composites* (WPC) son, por definición, materiales o productos constituidos principalmente por materiales celulósicos y materiales termoplásticos, que suelen ser procesados mediante técnicas de transformación de polímeros.

Los materiales celulósicos utilizados en los WPC pueden ser de diferente tipos y provenir de numerosas fuentes, desde fibras celulósicas refinadas, hasta residuos posindustriales del sector maderero. Los productos basados en WPC suelen ser catalogados de forma conjunta con los denominados *plastic lumber*, al tratarse de productos que se pueden utilizar en aplicaciones similares, donde se busca sustituir a productos de madera natural. Sin embargo hay una diferencia clave, los WPC son materiales compuestos en los que se utilizan materiales plásticos y madera, mientras que los *plastic lumber* se fabrican sólo a partir de plásticos reciclados después del consumo industrial.

2.1.1. Composición

Las fibras de madera se distribuyen de forma aleatoria dentro de la matriz de materiales plásticos. El porcentaje de fibras de madera varía en función del producto, desde un 70 por ciento e incluso porcentaje mayores, hasta llegar a los productos de plástico reciclados que no contienen fibras de madera.

2.1.2. Materiales plásticos

Se pueden utilizar los termoplásticos (que se reblandecen cuando se les aplica calor) o los termoedurecibles (que no se reblandecen con calor una vez que han fraguado). Dentro del grupo de los termoplásticos se encuentran los polietilenos y polipropilenos que se utilizan en multitud de aplicaciones no estructurales, como botellas o contenedores; y en el grupo de los termoendurecibles las resinas estructurales de poliéster y epoxi. Los residuos plásticos se pueden reforzar o aumentar de tamaño con fibras naturales, fibras de vidrio y otros materiales como el caucho.

2.1.3. Madera

El porcentaje de madera, tanto en forma de polvo como de fibras cortas (inferiores a 5 milímetros), varía normalmente desde el 50 hasta el 80 por ciento. La harina de madera se utiliza para dar cuerpo al producto, pero tiene una misión diferente al de las cargas que se utilizan en los adhesivos ya que en este caso su misión es de armado. Se desaconseja la utilización de polvo de madera o de otros materiales por el riesgo de explosión.

2.1.4. Aditivos

Los aditivos más frecuentes son los lubricantes, retardadores del fuego, productos que mejoran la unión madera - plástico, estabilizadores de rayos ultravioleta, pigmentos. La mezcla de materias primas se puede realizar por lotes o por procesos continuos y se fuerza su paso por una laminadora o por una extrusora o para inyectarse en los moldes correspondientes. La gran mayoría de los productos de madera y plástico son perfiles extruidos, macizos o huecos.

Tabla I. **Aditivos y sus usos**

Relleno/refuerzos	Usos
Alúmina trihidratada	Dilatador; retardante de flama; supresor de humo
Sulfato de bario	Se emplea como relleno y como pigmento blanco; aumenta la densidad relativa, la resistencia a la fricción y la resistencia química
Fibras de boro	Gran resistencia a la tensión y capacidad para soportar cargas de compresión
Carbonato de calcio	Dilatador, pigmento o relleno de uso más extendido para plásticos
Sulfato de calcio	Dilatador y mejora las propiedades físicas aumentando la resistencia al impacto, tensión y a la compresión
Negro de humo	Relleno es usado como pigmento y agente antiestático o auxiliar para formar enlaces transversales
Fibras de carbono/grafito	Refuerzo y resistencia mecánica de baja densidad
Fibras cerámicas	Refuerzo; resistencia a temperaturas muy altas
Feldespatos y sienita nefelina	Relleno de especialidad, fácil de mojar y dispersar; permite tener transparencia y translucidez; resistencia química y a la intemperie
Refuerzo de vidrio (fibra, tela, etc.)	Refuerzo de mayor volumen; gran resistencia mecánica, estabilidad dimensional, resistencia al calor, resistencia química

Continuación de la tabla I.

Caolín	Dilatador/pigmento se usa principalmente en alambre y cables, SMC y BMC, pisos de vinilos
Rellenos metálicos, filamentos	Se usan para impartir conductividad (térmica y eléctrica) o propiedades magnéticas, o para reducir la fricción
Mica	Refuerzo en hojuelas; mejora las propiedades dieléctricas, térmicas y mecánicas
Microesferas, huecas	Reduce el peso de los sistemas de plástico; mejora la rigidez y la resistencia al impacto
Microesferas, sólidas	Mejora las propiedades de flujo y la distribución de esfuerzos
Fibras poliméricas	Refuerzo ligero
Sílice	Rellenos/dilatadores/refuerzos; espesa los sistemas líquidos y los toma tixotrópicos; ayuda a evitar el deslaminado con PVC, pues actúa como agente aplanador
Talco	Dilatadores/refuerzos/rellenos; mayor rigidez, resistencia a la tensión y resistencia a la termofluencia
Wollastonita	Se puede agregar en gran proporción; mejora la resistencia mecánica, reduce la absorción de humedad, aumenta la estabilidad térmica y dimensional, mejora las propiedades eléctricas

Fuente: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/>. Consulta: 20 de abril 2013.

2.2. Termoplásticos

Un termoplástico es un plástico que, a determinada temperatura, es plástico deformable, se derrite cuando se calienta y se endurece en un estado vítreo cuando se enfría lo suficiente. La mayor parte de los termoplásticos son polímeros de alto peso molecular, los cuales poseen cadenas asociadas por medio de débiles fuerzas Van der Waals, fuertes interacciones dipolo-dipolo y enlace de hidrógeno, o incluso anillos aromáticos apilados, los polímeros termoplásticos difieren de los polímeros termoestables en que después de calentarse y moldearse pueden recalentarse y formar otros objetos, mientras que en el caso de los termoestables o termoduros, después de enfriarse la forma no cambia y arden.

Sus propiedades físicas cambian gradualmente si se funden y se moldean varias veces creando un historial térmico, generalmente disminuyen estas propiedades.

Los más usados son: el polietileno (PE), el polipropileno (PP), el polibutileno (PB), el poliestireno (PS), el polimetilmetacrilato (PMMA), el policloruro de vinilo (PVC), el politereftalato de etileno (PET), el teflón (o politetrafluoretileno, PTFE) y el *nylon* (un tipo de poliamida).

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

2.2.1. Polipropileno

Es un termoplástico que reúne una serie de propiedades que es difícil encontrar en otro material como son: su alta estabilidad térmica le permite trabajar durante mucho tiempo a una temperatura de 100 grados Celsius en el aire. También es resistente al agua hirviendo pudiendo esterilizarse a temperaturas de hasta 140 grados Celsius sin temor a la deformación

Ventajas

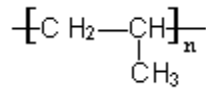
- Ligero
- Alta resistencia a la tensión y a la compresión
- Excelentes propiedades dieléctricas
- Resistencia a la mayoría de los ácidos y álcalis
- Bajo coeficiente de absorción de humedad
- No mancha

Aplicaciones típicas

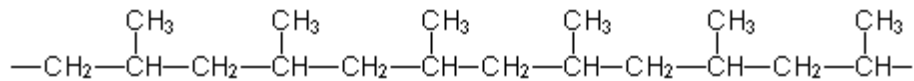
- Tanque y depósitos para químicos
- Mobiliario de laboratorio
- Placas de presión para filtros
- Componentes para bombas
- Prótesis

2.2.2. Estructura del polipropileno

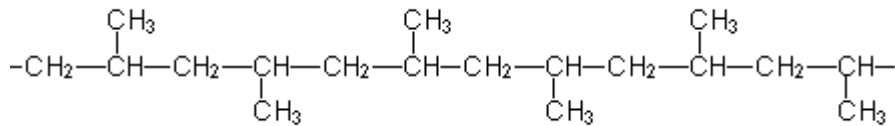
Estructuralmente es un polímero vinílico, similar al polietileno, sólo que uno de los carbonos de la unidad monomérica tiene unido un grupo metilo en un carbono secundario, dando 3 isómeros diferentes del polipropileno.



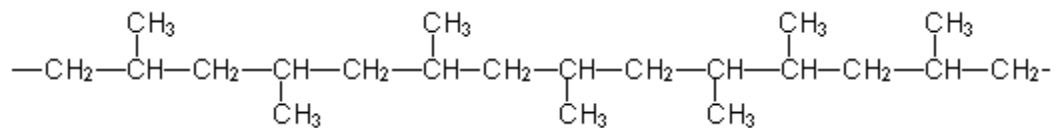
El polipropileno fabricado de manera industrial es un polímero lineal, cuya espina dorsal es una cadena de hidrocarburos saturados. Cada dos átomos de carbono de esta cadena principal, se encuentra ramificado un grupo metilo (CH_3). Esto permite distinguir tres formas isómeras del polipropileno:



Isotáctica



Sindiotáctica



Atáctica

Estas se diferencian por la posición de los grupos metilo $-\text{CH}_3$ con respecto a la estructura espacial de la cadena del polímero.

Las formas isotácticas y sindiotácticas, dada su gran regularidad, tienden a adquirir en estado sólido una disposición espacial ordenada, semicristalina, que confiere al material unas propiedades físicas excepcionales. La forma

atáctica, en cambio, no tiene ningún tipo de cristalinidad. Los procesos industriales más empleados están dirigidos hacia la fabricación de polipropileno isotáctico que es el que ha despertado mayor interés comercial.

2.2.3. Rango de productos

El rango de productos comprende homopolímeros, copolímeros bloque y copolímeros random los cuales tienen propiedades físico-mecánicas diferentes como rigidez y temperatura de inflamación.

2.2.3.1. Homopolímeros

Los homopolímeros, son altamente isotácticos y por ende muy cristalinos. Los artículos producidos con estos materiales presentan alta rigidez, dureza y resistencia a la deformación por calor.

2.2.3.2. Copolímeros de impacto

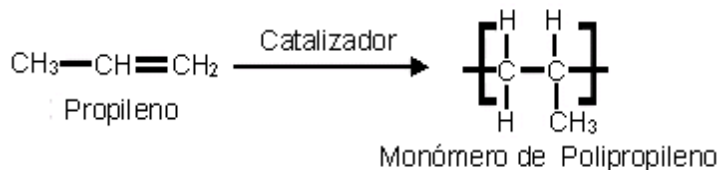
Los copolímeros de impacto son copolímeros en bloque de etileno-propileno que muestran una alta resistencia al impacto tanto a temperatura ambiente como a bajas temperaturas. La línea de productos ofrece una extensa gama de fluencias. El rango de resistencia al impacto se extiende desde moderada a muy alta, con materiales que poseen un alto contenido de goma y una alta resistencia al impacto a muy bajas temperaturas. En el otro extremo se encuentra el 2240P, que es un material de moderado impacto, elevada rigidez y alta resistencia a la deformación por calor.

2.2.3.3. Copolímeros random

Los copolímeros random poseen un menor grado de cristalinidad que los homopolímeros, por lo que presentan un rango de fundido más amplio, mayor transparencia y son más resistentes al impacto a temperatura

2.2.4. Obtención de polipropileno

Se obtiene mediante una reacción de polimerización del propileno en presencia de un compuesto alquilmetálico, que cumple la función de aumentar la velocidad de la reacción de polimerización.



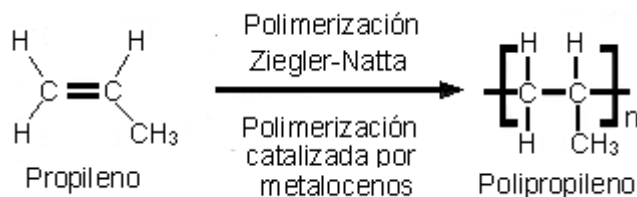
El propileno es el polímero comercial de más baja densidad y facilidad de moldeo. Se utiliza en una gran cantidad de láminas, fibras y filamentos. Entre sus propiedades cabe destacar su alto punto de fusión (no funde por debajo de los 160 grados Celsius), una gran rigidez, alta resistencia a la rotura y a la abrasión, propiedades dieléctricas, bajo rozamiento, superficie brillante y flotación en agua. Es resistente a los ácidos, a los álcalis y a muchos disolventes orgánicos. Se recalienta cerca de los 100 grados Celsius.

El polipropileno se comercializa con distintos pesos moleculares según su finalidad. Además del polipropileno existen en el mercado una gran cantidad de copolímeros del propileno. Los más importantes son los de propileno-etileno.

2.2.5. Características generales

El polipropileno es uno de esos polímeros versátiles que tiene múltiples aplicaciones. Cumple una doble tarea, como plástico y como fibra. Como plástico se utiliza para hacer productos como envases para alimentos capaces de ser lavados en un lavaplatos. Esto es factible porque no se funde por debajo de 160 grados Celsius. El polietileno, un plástico más común, se recalienta a aproximadamente 100 grados Celsius, lo que significa que los platos de polietileno se deformarían en el lavaplatos. Como fibra, el polipropileno se utiliza para hacer alfombras de interior y exterior, la clase que se encuentra siempre alrededor de las piscinas y las canchas de mini-golf.

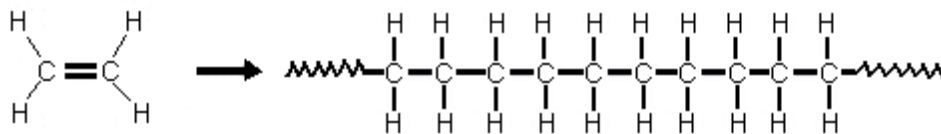
Funciona bien para alfombras al aire libre porque es sencillo hacer polipropileno de colores y porque el polipropileno, a diferencia del nylon, no absorbe el agua. Estructuralmente es un polímero vinílico, similar al polietileno, sólo que uno de los carbonos de la unidad monomérica tiene unido un grupo metilo. El polipropileno se puede hacer a partir del monómero propileno, por polimerización Ziegler-Natta y por polimerización catalizada por metallocenos.



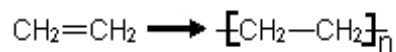
2.2.6. Polipropileno polímero vinílico

Los polímeros vinílicos son polímeros obtenidos a partir de monómeros vinílicos; de pequeñas moléculas conteniendo dobles enlaces carbono-carbono.

Constituyen una gran familia de polímeros. Se obtiene un polímero vinílico a partir de un monómero vinílico, usando el polímero vinílico más simple, el polietileno. El polietileno se obtiene a partir del monómero etileno, llamado también eteno. Cuando polimeriza, las moléculas de etileno se unen por medio de sus dobles enlaces, formando una larga cadena de varios miles de átomos de carbono conteniendo sólo enlaces simples entre sí.



Escribiéndola de forma abreviada nos queda.



Los polímeros vinílicos más sofisticados se obtienen a partir de monómeros en los cuales uno o más de los átomos de hidrógeno del etileno han sido reemplazados por otro átomo o grupo atómico. Si se reemplaza uno de los átomos de hidrógeno se puede obtener un gran número de plásticos.

2.2.7. Propiedades

Es muy importante tener un conocimiento general de este polímero, en lo que concierne a propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas. En la siguiente tabla aparecen un compendio de propiedades que permite hacer una idea general de cómo va a ser el polímero con el que se trabaja con las principales propiedades del polipropileno agrupadas en función de sus características:

Tabla II. **Propiedades eléctricas**

Propiedades	
Constante Dieléctrica MHz	2,2-2,6
Factor de Disipación MHz	0,0003 - 0,0005
Resistencia Dieléctrica (kV mm⁻¹)	30-40
Resistividad Superficial (Ohm/sq)	10 ¹³
Resistividad de Volumen (Ohmcm)	10 ¹⁶ -10 ¹⁸

Fuente: bibliográfica núm. 11.

Tabla III. **Propiedades mecánicas**

Propiedades	
Alargamiento a la Rotura (%)	150-300, para filmes biax. >50
Coeficiente de Fricción	0,1-0,3
Dureza - Rockwell	R80-100
Módulo de Tracción (GPa)	0,9-1,5 - par filmes biax. 2,2-4,2,
Resistencia a la Abrasión - ASTM D1044 (mg/1000 ciclos)	13-16
Resistencia a la Tracción (MPa)	25-40, para filmes biax. 130-300,
Resistencia al Impacto (J m⁻¹)	20-100

Fuente: bibliográfica núm. 11.

Tabla IV. **Propiedades físicas**

Propiedades	
Absorción de Agua - Equilibrio (%)	0,03
Densidad (g cm⁻³)	0,9
Índice Refractivo	1,49
Índice de Oxígeno Límite (%)	18
Inflamabilidad	Combustible
Resistencia a los Ultra-violetas	Aceptable

Fuente: bibliográfica núm. 11.

Tabla V. **Resistencia química**

Ácidos - diluidos	Condicionamente estable
Alcoholes	Condicionamente estable
Esteres	Condicionamente estable
Cetonas	Condicionamente estable
Éteres	Condicionamente estable
Aceites y Grasas	Condicionamente estable
Ácidos - concentrados	Inestable
Álcalis concentrados	Inestable
Hidrocarburos clorados	Inestable
Benzol	Inestable
Carburantes	Inestable

Fuente: bibliográfica núm. 11.

Tabla VI. **Propiedades térmicas**

Propiedades	
Calor Específico (J K⁻¹ kg⁻¹)	1700 - 1900
Coeficiente de Expansión Térmica (x10⁻⁶ K⁻¹)	100-180
Conductividad Térmica a 23C (W m⁻¹ K⁻¹)	0,1-0,22
Temperatura Máxima de Utilización (°C)	90-120
Temperatura Mínima de Utilización (°C)	-10 a -60
Temperatura de Deflexión en Caliente - 0.45MPa (°C)	100-105
Temperatura de Deflexión en Caliente - 1.8MPa (°C)	60-65

Fuente: bibliográfica núm. 11.

Tabla VII. **Propiedades de la película de polipropileno**

Alargamiento a la Rotura	%	50-1000
Factor de Disipación MHz		0,0003
Permeabilidad al Agua 25 °C	x10 ⁻¹³ cm ³ . cm cm ⁻² s ⁻¹ Pa ⁻¹	16
Permeabilidad al CO₂ 25 °C	x10 ⁻¹³ cm ³ . cm cm ⁻² s ⁻¹ Pa ⁻¹	6 @ 30C
Permeabilidad al Hidrógeno 25 °C	x10 ⁻¹³ cm ³ . cm cm ⁻² s ⁻¹ Pa ⁻¹	31
Permeabilidad al Nitrógeno 25 °C	x10 ⁻¹³ cm ³ . cm cm ⁻² s ⁻¹ Pa ⁻¹	0,4 @ 33C
Permeabilidad al Oxígeno 25 °C	x10 ⁻¹³ cm ³ . cm cm ⁻² s ⁻¹ Pa ⁻¹	1,7 @ 30C
Resistencia Dieléctrica a 25 μm	kV mm ⁻¹	200
Resistencia al Desgarro Inicial	g μm ⁻¹	18-27
Temperatura de Sellado en Caliente	°C	140-205

Fuente: bibliográfica núm. 11.

2.2.8. Aplicaciones

A partir de los procesos industriales se pueden preparar un sin fin de productos de polipropileno diferentes, cuyas propiedades varían según la longitud de las cadenas del polímero (peso molecular), de su polidispersidad, de los comonómeros eventualmente incorporados. Estas características básicas definen las propiedades mecánicas del material y sus aplicaciones finales.

Literalmente se habla de diferentes tipos o grados de polipropileno. Por todo esto, la gran diversidad de productos producidos con esta poliolefina le permite tener aplicaciones tan variadas como:

- Autopartes
- Baldes, recipientes, botellas
- Muebles y juguetes
- Películas para envases de alimentos
- Fibras y filamentos
- Bolsas y bolsones
- Fondo de alfombras
- Pañales, toallas higiénicas, ropa

2.3. Madera Teca

La Teca (*Tectona grandis*), es un árbol frondoso de la familia de las verbenáceas que alcanza hasta 30 metros de altura, nombrada como la reina de las maderas, pues su apariencia se hace más bella con el paso de los años y tiene la capacidad de no dañarse cuando entra en contacto con metales, lo que la hace muy valiosa para la fabricación de muebles de alto valor y embarcaciones lujosas, es nativo de la India, Birmania, Laos y Tailandia,

actualmente se encuentra la Teca en muchos otros países asiáticos, y extensas plantaciones se han establecido también en África y América Central y del Sur.

Se ha hecho evidente que la explotación de los bosques naturales no puede seguir respondiendo a la demanda de madera de Teca, y la insuficiencia previsible de este material ha avivado el interés por las plantaciones de teca.

2.3.1. Propiedades

La especie arbórea teca tiene una densidad entre 650 y 750 kilogramos por metro cúbico, con una media de 690 kilogramos por metro cúbico al 12 por ciento de humedad. Se considera una madera pesada y de dureza media. Tiene una resistencia media a la flexión, poca rigidez y resistencia al impacto, una resistencia alta a la comprensión y un grado moderado de doblado con vapor.

Tabla VIII. **Contenido de la madera**

	Valor
Celulosa	0,39 % y el 71,10 %
Lignina	23 % y 32 %,
Extraíbles	4,53 % y 7,20 %,
Taninos sin tomar en cuenta la corteza	0,19 % y el 0,95 %
Cenizas	0,9 % y 1,6 %,

Fuente: bibliográfica núm. 6.

2.3.2. Requerimientos

Su crecimiento puede darse en variadas condiciones, lo que permite cultivarla en varias zonas con diferentes climas, pero si se desea una madera de alta calidad deben de cumplirse las siguientes condiciones:

- Altura: entre los 0 y 800 metros sobre el nivel del mar
- Suelos: ricos en calcio, planos y con un buen drenaje
- Temporada lluviosa: entre 1 500 a 2 500 milímetros de precipitación
- temporada seca: entre 10 y 50 milímetros durante 3 meses

Requiere de climas con una estación seca bien definida de 3 a 5 meses, con temperaturas medias anuales entre 22 y 28 grados Celsius, una precipitación media anual de 1 250 a 2 500 milímetros.

Entre los factores limitantes más importantes para la especie se consideran los suelos poco profundos, compactados o arcillosos, con bajo contenido de calcio o magnesio, con pendiente, mal drenaje y altitudes mayores a 1 000 metros.

Si estas condiciones no se cumplen, se obtiene una madera de menor calidad y menor valor comercial. Las mejores maderas de teca provienen de árboles viejos por encima de 20 años de edad al ser cortados.

2.4. Propiedades y características de la madera plástica

Las propiedades a evaluar dependen de su uso en exterior o en interior, pero todavía no existe norma de especificaciones, aunque las principales propiedades a comprobar son las siguientes:

- Físicas: densidad, contenido de humedad
- Mecánicas: resistencia al impacto, tracción
- Durabilidad: envejecimiento artificial, hinchazón y absorción
- Térmicas: dilatación lineal, conductividad térmica, acción del calor
Fuego: límite de oxígeno, reacción al fuego

2.4.1. Propiedades mecánicas

Los productos de madera-plástico son menos rígidos que la madera, su resistencia también es menor, se deforman cuando están sometidos a cargas, se reblandecen bajo la acción del calor y son quebradizos a bajas temperaturas. Sus resistencias a la tracción y a la compresión son similares a la de la madera de coníferas, pero en la mayoría de las aplicaciones estas propiedades no son relevantes. En aquellas aplicaciones que requieran una mayor rigidez, como por ejemplo en los suelos de terrazas exteriores, la solución es aumentar su sección transversal o su espesor o reducir la distancia entre apoyos.

2.4.2. Estabilidad dimensional

Aunque no se producen alabeos y la absorción de humedad es inferior a la de la madera maciza, en cualquier caso es necesario dejar juntas para absorber los cambios dimensionales originados por sus mayores coeficientes de dilatación (parecidos a los del aluminio).

2.4.3. Durabilidad y envejecimiento

La acción del sol tiende a oscurecerla por lo cual suele ser de color gris claro. Tiene elevadas resistencias frente al ataque de hongos, insectos xilófagos de ciclo larvario, termitas y xilófagos marinos. Algunos productos

incorporan protectores para prevenir la aparición de mohos y el crecimiento de hongos aunque en los primeros prototipos para suelos se producían pudriciones cubicas, pudriciones blandas, fendas, deshilachados y meteorizaciones. Posteriormente se perfeccionaron los productos en este sentido.

2.4.4. Otras propiedades

Su resistencia al deslizamiento es mayor que la de la madera natural en ocasiones se pueden producir descargas de electricidad estática y una gran ventaja de la madera plástica es que se puede reciclar.

Están considerados como productos compuestos ecológicos. Son más caros que la madera natural y tratada, pero al considerar su ciclo de vida y su ausencia de mantenimiento su coste final presenta ciertas ventajas.

2.5. Producción

Son producidos mezclando completamente partículas de madera y de resina termoplástica calentada. El método más común de producción es extruir el material en la forma deseada, aunque también se utiliza moldeo por inyección. Los *Wood Polímero Composites* puede ser producido a partir de termoplásticos vírgenes o reciclados, como: polietilenos de alta densidad, polietilenos de baja densidad, polipropileno, politereftalato de etileno, polioruro de vinilo, polibutileno, poliestireno y Polietileno. El más común es a base de polietileno.

Aditivos tales como colorantes, agentes de acoplamiento, estabilizadores de rayos ultravioleta, agentes de soplado, agentes espumantes, y lubricantes ayudan a adaptar el producto final al objetivo de aplicación. Los *Wood Polímero*

Composites extruidos se pueden formar en perfiles macizos y huecos. Una gran variedad de piezas moldeadas por inyección también se producen, desde paneles de puerta de automóvil hasta cubiertas del teléfono celular.

En algunas instalaciones de fabricación, los componentes se combinan y se procesan en una extrusora de peletización, que produce gránulos del material. Los *pellets* se vuelven a fundir y se conforman en la forma final.

Otro método consiste en conformar la pieza acabada en un solo paso de mezclado y extrusión/inyección (IMC: *injection molding composite*) sin pasar por el peletizado.

2.5.1. Extrusión

La extrusión de estos compuestos es la técnica más utilizada para fabricar perfiles de este material, pero también es utilizada para realizar el compuesto, esto sucede por medio de una mezcla física, que en combinación con agentes de acoplamiento puede formar algunos enlaces químicos o formar emulsiones, de forma que el material sea estable y posteriormente pueda ser inyectado o moldeado por compresión.

La extrusión de los compuestos de madera y plástico presenta algunos desafíos tecnológicos respecto de la extrusión tradicional. El primer problema presente es la alimentación del material en la tolva, el polvo de madera y gránulos de material plástico son alimentados en la tolva, sin embargo el polvo fino de madera tiende a conglomerarse en la boca de la tolva, que por acción del calor y de la humedad se pega y no entra al cañón y no tiene contacto con el husillo.

La extrusión puede ocurrir en un equipo de:

- Doble husillo
- Husillo sencillo

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

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

2.5.2. Inyección

La inyección de compuestos de madera y plástico obedece en general a la misma técnica utilizada en el moldeo por inyección, sin embargo es necesario tomar en cuenta algunos puntos técnicos importantes como, temperatura de degradación del compuesto, pues temperaturas mayores de 205 grados Celsius pueden causar problemas de degradación y temperaturas demasiado bajas impedirían una mezcla adecuada de los materiales.

La temperatura del molde puede mantenerse un poco más elevada que en la inyección tradicional debido a que la madera en el compuesto permite una estabilidad dimensional mejor que el polímero solo, por ello un enfriamiento menos intensivo resulta en un ahorro de tiempo y costos.

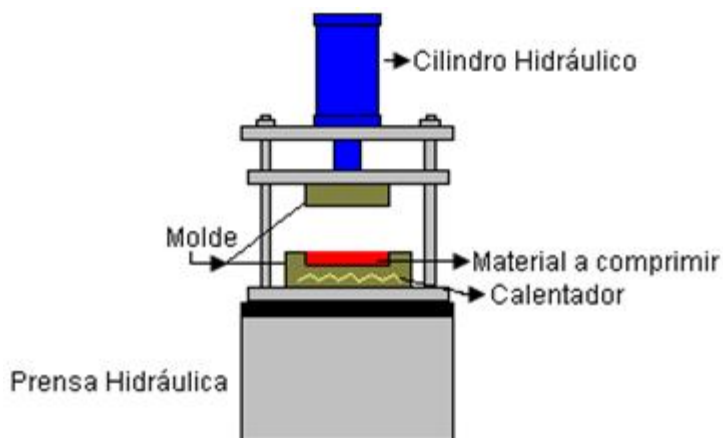
El flujo del compuesto en la cavidad del molde ocurre con mayor rapidez cuando la temperatura del molde es alta.

2.5.3. Moldeo por compresión

El moldeo por compresión es el método más difundido para la producción de compuestos de madera y plástico, en esta técnica son utilizadas comúnmente fibras naturales (como virutas) además de la harina de madera.

Es uno de los procesos de transformación de plásticos más antiguos que existe cuyo origen se remonta a principios del siglo XIX, aunque no comenzó a implementarse a escala industrial hasta 1908, cuando Leo Baekeland desarrolló las resinas fenol-formaldehído, que siguen empleándose aún hoy en día.

Figura 1. Moldeo por compresión



Fuente: elaboración propia, con programa de Microsoft Paint 2007.

El moldeo por compresión es un método en el que el material de moldeo (madera y aglutinante), en general precalentado, es colocado en la cavidad del molde abierto. El molde se cierra, se aplica calor y presión para forzar a los materiales a unirse en un solo compuesto y a entrar en contacto con todas las áreas del molde, mientras que el calor y la presión se mantiene hasta que el material de moldeo se ha curado.

El proceso se emplea en resinas termoestables en un estado parcialmente curado. El moldeo por compresión es un método de alta presión, adecuado para el moldeo de piezas complejas, de alta resistencia con refuerzos de fibra de vidrio. Los compuestos termoplásticos, aunque en menor medida, también pueden ser moldeados por compresión con refuerzos de cintas unidireccionales, tejidos, fibras orientadas al azar o de hilos cortados e ideal para la creación de maderas plásticas pues permite una unión adecuada en los compuestos usados.

La ventaja de moldeo por compresión es su capacidad para moldear piezas grandes, bastante intrincadas o complejas. Además, es uno de los métodos de más bajo costo en comparación con el moldeo por otros métodos, por otra parte se desperdicia poco material, dándole una ventaja cuando se trabaja con compuestos de altos precios. Sin embargo, el moldeo por compresión a menudo proporciona productos de pobre consistencia y dificultad en el acabado, y no es adecuado para algunos tipos de piezas.

En este proceso se produce una menor degradación de la longitud de la fibra en comparación con el moldeo por inyección. El moldeo de compuestos a granel y el moldeo de lámina compuesta utilizan este método de moldeo, estos compuestos son conformados a la forma del molde por la presión aplicada y se calienta hasta que se produce la reacción de curado. Los materiales pueden ser

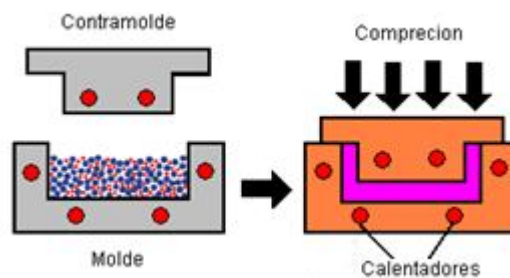
cargados en el molde, ya sea en forma de pellets o lámina, o el molde se puede cargar desde una extrusora de plastificación. Los materiales se calientan por encima de su punto de fusión, se forman y se enfrían. El material de alimentación se distribuye en forma uniforme en la superficie del molde, la orientación del flujo se produce durante la fase de compresión.

En la creación de maderas plásticas los moldes son cargados con plástico virgen en forma de pellets o reciclados y con fibra de madera en porcentajes variantes de acuerdo a la presión y la temperatura, el calor generado en la compresión fusiona ambos compuestos (aglutinante y fibra) creando así madera plástica.

2.5.3.1. Definición del proceso

El moldeo por compresión es un proceso de conformación en que se coloca un material plástico con fibras de madera directamente en un molde de metal, se aumenta la temperatura del molde lo que ablanda el material plástico obligando a la mezcla a fusionarse y conformarse con la forma del molde en el molde cerrado.

Figura 2. Molde para una pieza por compresión



Fuente: elaboración propia, con programa de Microsoft Paint 2007.

2.5.3.2. Esquema del proceso

El moldeo por compresión se inicia, con una cantidad determinada de los compuestos a utilizar la que es colocada o introducida en un molde. Luego el material se calienta a un estado maleable y moldeado con lo cual se une el aglutinante a la fibra de madera. Poco después, la prensa hidráulica comprime el plástico flexible y la fibra contra el molde, dando como resultado una pieza perfectamente moldeada compuesta por plástico y madera que mantiene la forma de la superficie interior del molde. Después la prensa hidráulica retrocede, un pin eyector en el fondo del molde rápidamente expulsa la pieza final fuera del molde y entonces, el proceso concluye.

2.6. Ventajas y desventajas

Los *Wood Polímero Composites* no se corroen y son muy resistentes a la putrefacción, decaimiento, y al ataque del agua salada de mar, a pesar de que absorben el agua en las fibras de madera incrustadas en el material. Presentan facilidad en el mecanizado y puede ser formado usando herramientas convencionales de carpintería. Los *Wood Polímero Composites* se consideran a menudo un material sostenible, ya que se pueden hacer usando plásticos reciclados y los productos de desecho de la industria de la madera. Aunque estos materiales continúan la vida útil de los materiales utilizados y desechados, y tienen su propia vida media considerable, los compuestos de madera-plástico son difíciles de reciclar de nuevo después de su uso.

Una ventaja más sobre la madera es la capacidad del material para ser moldeado para satisfacer casi cualquier forma deseada. Otra ventaja importante de estos materiales es su falta de necesidad de pintura. Se fabrican en una variedad de colores. A pesar de tener hasta 70 por ciento de contenido de

celulosa (aunque 50/50 es más común), el comportamiento mecánico de los *Wood Polímero Composites* es más similar a polímeros puros.

Esto significa que tienen una menor resistencia y rigidez que la madera, y que experimentan un comportamiento dependiente del tiempo y de la temperatura. Las partículas de madera son susceptibles al ataque de hongos, aunque no tanto como la madera maciza, y el componente de polímero es vulnerable a la degradación de los rayos ultravioleta. Es posible que la resistencia y la rigidez se puedan reducir por la absorción de humedad y ciclos de congelación-descongelación, aunque las pruebas se siguen llevando a cabo en este aspecto. Algunas formulaciones de *Wood Polímero Composites* son también sensibles a las manchas de una variedad de agentes.

2.7. Usos

Una de las principales aplicaciones de este tipo de materiales se encuentra en el recubrimiento de superficies que se encuentran a la intemperie, siendo ampliamente utilizados en muelles, terrazas, y otras superficies cerca de piscinas o en centros de recreación. Las ventajas inherentes para estas aplicaciones radican en una mayor resistencia a la humedad y a los insectos, unido a un bajo nivel de mantenimiento.

Otro uso común de los plásticos reforzados con madera es en la fabricación de perfiles extruidos. Estos perfiles se pueden utilizar para la fabricación de perfiles para puertas y ventanas, juegos para niños, sillas, o para reemplazar los durmientes de las vías férreas. En el caso de la fabricación de perfiles, se ha comenzado a explorar la posibilidad de hacer perfiles espumados en el interior. Aunque ya algunos fabricantes han implementado este proceso por las ventajas que presenta en el ahorro de costos de materia prima y

disminución en peso, todavía es necesario profundizar más en el entendimiento del proceso de manufactura.

Por otra parte, los materiales reforzados con madera han ingresado en el campo de la fabricación de automóviles, desplazando a los plásticos reforzados con fibra de vidrio en la producción de algunas piezas. Esta tendencia comenzó en Europa, donde dichos materiales son usados para fabricar paneles interiores de puertas, espaldares de asientos, apoya-cabezas, guardafangos y bandejas para guardar objetos. La tendencia ha llegado a Estados Unidos, y el impacto ha sido tal, que grandes fabricantes de materiales reforzados con fibra de vidrio. Los compuestos de plástico-madera también son ampliamente utilizados en la fabricación de pellets, plataformas, tacos para calzado y artículos náuticos.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

En esta investigación, las variables independientes corresponden a tiempo, temperatura, presión, porcentaje de mezcla de la madera plástica, tamaño de partícula y el contenido de humedad del aserrín.

Y las variables dependientes: densidad, humedad relativa de la madera plástica, resistencia a la ruptura, temperatura de inflamación.

3.2. Delimitación del campo de estudio

Esta investigación, se llevo a cabo a nivel laboratorio, utilizando polipropileno como agente aglutinante con el aserrín proveniente de madera de la especie arbórea Teca, se realizaron diferentes mezclas variando el porcentaje en peso en 40, 50 y 60 por ciento. La materia prima se obtuvo en dos partes, el material natural (aserrín) se recolecto en el laboratorio de Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería y se compro el polipropileno en pellets de 1/10 de pulgada.

Las muestras se prepararon tamizando el aserrín con un tamiz número 40, y retenida por un tamiz número 60, determinando el porcentaje de humedad luego se pesaran las muestras para los diferentes porcentajes, se mezclaran hasta obtener una muestra homogénea luego se utilizó la prensa hidráulica para obtener las piezas de madera plástica.

3.3. Recursos disponibles

Los recursos con los que se contaron para realizar esta investigación, se dividieron en 2 partes, recurso humano, que fue el encargado de realizar la investigación y la infraestructura donde se realizó la investigación.

3.3.1. Recurso humano

Para el desarrollo de la parte experimental de esta investigación, se contó con el siguiente recurso humano. Asesor de la investigación, el ingeniero Jorge Emilio Godínez, y como investigador, Mauricio Valentino Rivera.

3.3.2. Infraestructura

La parte experimental de la investigación se realizó en el Laboratorio Multipropósito de Sección de Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

3.4. Recursos y materiales disponibles

Los recursos con los que se contó para el desarrollo de la parte experimental de esta investigación, se dividieron en 3 clasificaciones que son: materias primas, materiales, reactivos y materiales.

3.4.1. Materia prima

El aserrín se obtuvo de la especie arbórea teca en el área del Laboratorio Multipropósito de Sección de Tecnología de la Madera, del Centro de Investigaciones de Ingeniería, el polipropileno se compró virgen.

3.4.2. Equipo para la elaboración de las piezas de madera plástica

En esta sección, se describe el equipo que se utilizó en el Laboratorio Multipropósito de Sección de Tecnología de la Madera de Centro de Investigaciones para la elaboración de las piezas de madera plástica.

- Molde de metal redondo de diámetro de 4 ½ pulgada espesor de ½ pulgada.
- Colector de sedimentos de 3 HP 110 voltios marca Powerful Machinery.
- Prensa hidráulica con una capacidad de 50 toneladas Shop press.
- Horno eléctrico de convección natural de 220 v de 65,5x43x85,5 centímetros.
- Tamices números 40 y 60.

3.4.3. Equipo para la determinación de los parámetros a comparar

En esta sección, se describe el equipo que se utilizó en el Laboratorio Multipropósito de Sección de Tecnología de la Madera de Centro de Investigaciones para realizar las pruebas de los parámetros a comparar de las piezas de madera plástica.

- Termómetro infrarrojo 50 a 400 grados Celsius.
- Balanza Tauch Scream 2000X0,01 gramos con resolución de 0.01 gramos de 120 voltios.
- Horno Mufla para banco 212 de 100 a 1 100 grados Celsius de 120 voltios dimensiones de la cámara interior de 12,7x10,8x15,2 centímetros peso 10 kilogramos.

- Plancha de agitación y calentamiento 120 voltios marca Isotemp Fisher.
- Pinzas.
- Guantes de cuero.
- Balanza de humedad 0 a 50 gramos sensibilidad 0,001 gramos rango de humedad de 0,0 a 100 por ciento con temperatura máxima de 160 grados Celsius pantalla LCD.
- Calibrador Vernier de 8 pulgadas digital 0,01 milímetros intervalo de 0-8 pulgadas.

3.4.4. Reactivos y materiales

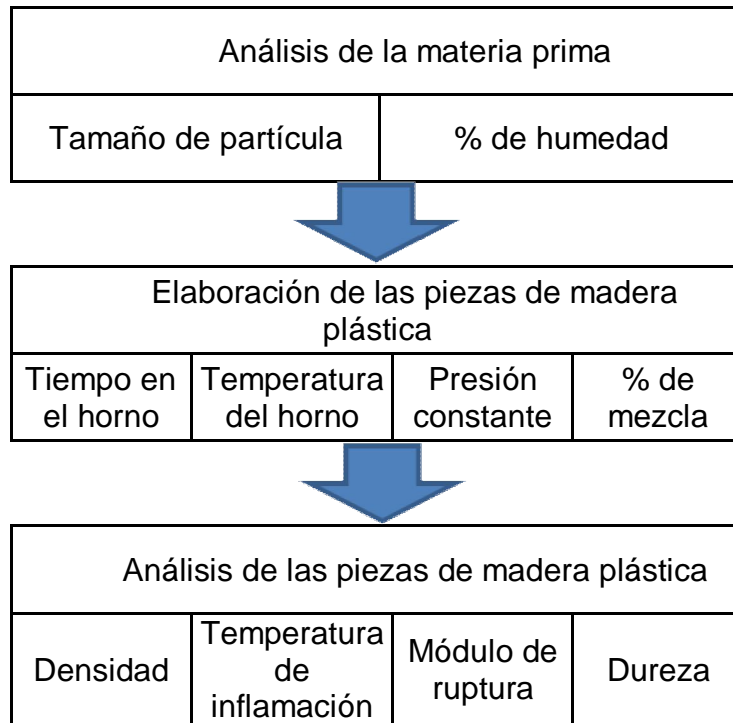
En esta sección, se describe los reactivos y materiales que se utilizo en el Laboratorio Multipropósito de Sección de Tecnología de la Madera de Centro de Investigaciones para realizar las piezas de madera plástica.

- Saco de 25 kilogramos de polipropileno homo polímero virgen.
- Aserrín de la especie arbórea Teca.
- Papel aluminio.

3.5. Técnica cualitativa y cuantitativa

Esta investigación utilizó un análisis cuantitativo, ya que se realizaran mediciones exactas de diversos parámetros así como pruebas destructivas. A continuación se muestra un esquema y las mediciones cuantitativas que se realizaran:

Figura 3. **Análisis cuantitativos**



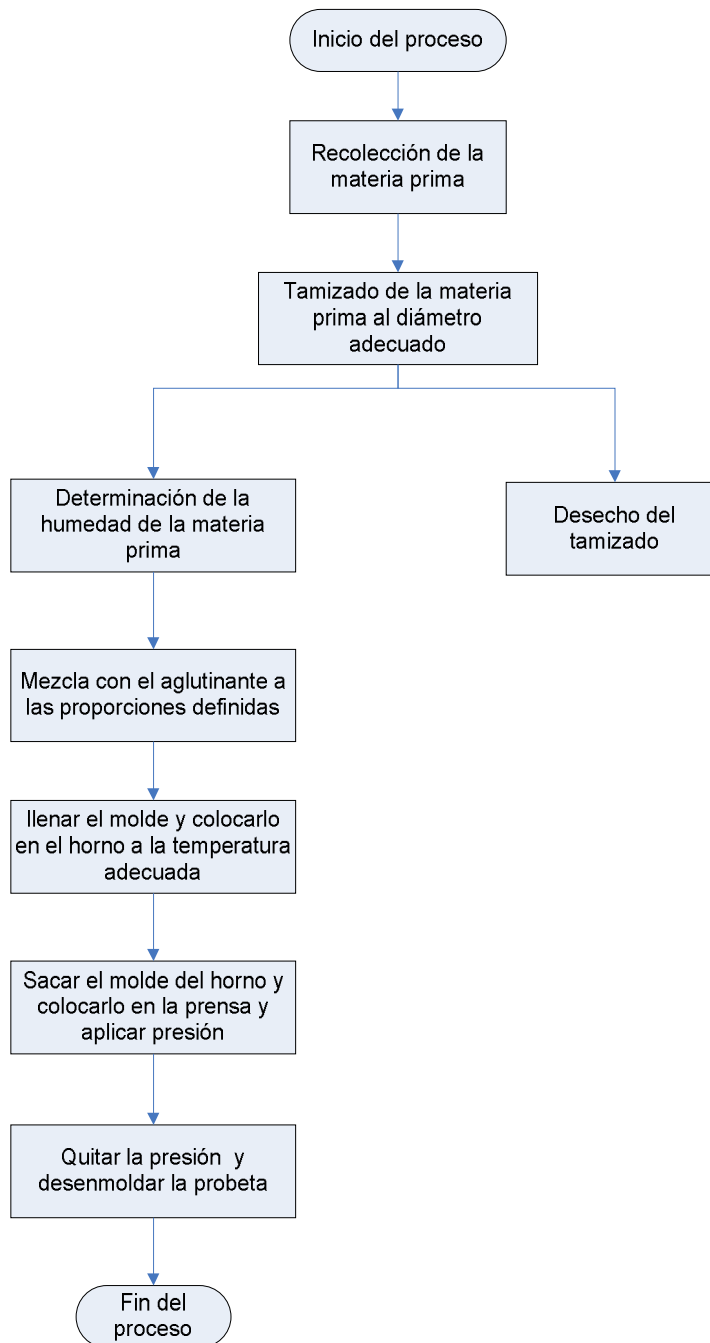
Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **División de los experimentos en grupos para su comparación**

Experimento E ₁₁	40 % de aglutinante 60 % de aserrín pasado por el tamiz número 40 y retenido por el número 60 a 140 °C a 2, 4 y 6 toneladas de presión a 35, 45 y 55 minutos en el horno.
Experimento E ₁₂	40 % de aglutinante 60 % de aserrín pasado por el tamiz número 40 y retenido por el número 60 a 160 °C a 2, 4 y 6 toneladas de presión a 35, 45 y 55 minutos en el horno.
Experimento E ₁₃	40 % de aglutinante 60 % de aserrín pasado por el tamiz número 40 y retenido por el número 60 a 180 °C a 2, 4 y 6 toneladas de presión a 35, 45 y 55 minutos en el horno.
Experimento E ₂₁	50 % de aglutinante 50 % de aserrín pasado por el tamiz número 40 y retenido por el número 60 a 140 °C a 2, 4 y 6 toneladas de presión a 35, 45 y 55 minutos en el horno.
Experimento E ₂₂	50 % de aglutinante 50 % de aserrín pasado por el tamiz número 40 y retenido por el número 60 a 160 °C a 2, 4 y 6 toneladas de presión a 35, 45 y 55 minutos en el horno.
Experimento E ₂₃	50 % de aglutinante 50 % de aserrín pasado por el tamiz número 40 y retenido por el número 60 a 180 °C a 2, 4 y 6 toneladas de presión a 35, 45 y 55 minutos en el horno.
Experimento E ₃₁	60 % de aglutinante 40 % de aserrín pasado por el tamiz número 40 y retenido por el número 60 a 140 °C a 2, 4 y 6 toneladas de presión a 35, 45 y 55 minutos en el horno.
Experimento E ₃₂	60 % de aglutinante 40 % de aserrín pasado por el tamiz número 40 y retenido por el número 60 a 160 °C a 2, 4 y 6 toneladas de presión a 35, 45 y 55 minutos en el horno.
Experimento E ₃₃	60 % de aglutinante 40 % de aserrín pasado por el tamiz número 40 y retenido por el número 60 a 180 °C a 2, 4 y 6 toneladas de presión a 35, 45 y 55 minutos en el horno.

Fuente: elaboración propia.

Figura 4. **Diagrama de flujo del proceso de creación de las piezas de madera plástica**



Fuente: elaboración propia.

3.6. Recolección de la información

Las variables fueron recolectadas y documentadas en las etapas de caracterización de la materia prima, elaboración de las piezas de madera plástica y evaluación de las propiedades físico-mecánicas. A continuación se detalla la metodología experimental.

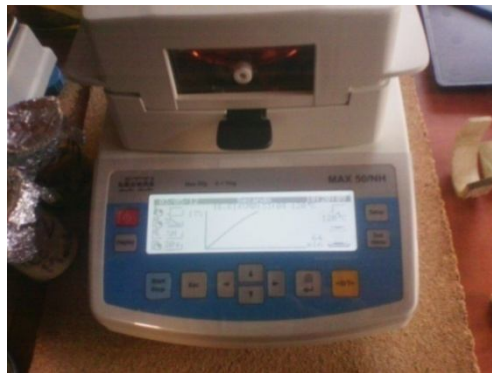
3.6.1. Método para la recolección de materia prima

El aserrín se recogerá con el colector de sedimentos, cuando se corte madera de teca en el Laboratorio Multipropósito de Sección de Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la siguiente forma:

- Se debe limpiar el extractor de aserrín para que no contenga partículas de otras maderas.
- Se tiene que limpiar la sierra de banco para que no tenga ningún residuo de otra madera o producto.
- Encender el extractor luego la sierra de banco y el extractor acumulara en las bolsas el aserrín.
- El aserrín se recoge de los sacos del extractor y es almacenado para que no se mezcle con otras sustancias.
- Tamizar el aserrín con las mallas 40 y 60, utilizar como materia prima lo retenido en la malla 60 para tener un tamaño de partícula entre 0,375 y 0,246 milímetros.

- Utilizar la balanza de humedad para determinar el contenido de humedad.

Figura 5. **Balanza de humedad**



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

Figura 6. **Tamices**



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

Figura 7. **Extractor**



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

3.6.2. Procedimiento para crear las piezas de madera plástica

Se utilizó el horno en el laboratorio de Tecnología de la Madera del centro de Investigaciones de Ingeniería para calentar la mezcla luego se utilizó la prensa hidráulica para compactar el material caliente.

- Pesar las muestras mezclando en proporciones de 40, 50 y 60 por ciento en peso de aserrín con el aglutinante.
- Mezclar hasta tener una fórmula homogénea.
- Colocar la mezcla en el molde.

- Encender el horno y ajustar la temperatura del horno a los valores establecidos 140, 160, 180 grados Celsius.
- Introducir el molde al horno ya calentado a las temperaturas de operación.
- Sacar las piezas de madera plástica a los tiempos fijados 35, 45 y 55 minutos
- Colocar el molde caliente en la prensa hidráulica y comprimir.
- Desmoldar las piezas de madera plástica.

Figura 8. **Horno eléctrico**



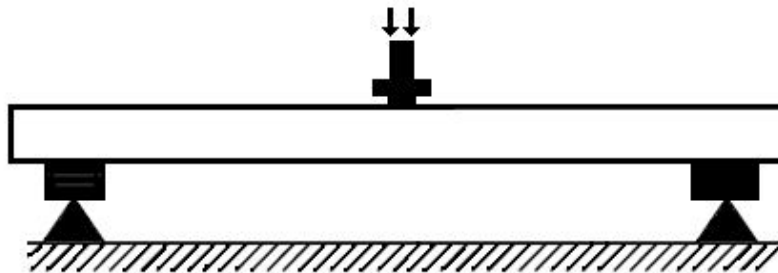
Fuente: Laboratorio Multipropósito de Sección de Tecnología de la Madera. CII. USAC.

3.6.3. Procedimiento para determinar la resistencia a la ruptura

La resistencia a la ruptura, se determinó utilizando la máquina que hay en el Laboratorio Multipropósito Sección de Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería con el siguiente procedimiento.

- Colocar la pieza de madera en la máquina de acuerdo a la figura No. 9.
- Aplicar una fuerza constante hasta que la pieza falle y se rompa.
- Leer el valor de la fuerza aplicada a la pieza en el momento de la falla.

Figura 9. Forma de colocar las piezas de madera plástica



Fuente: elaboración propia.

Figura 10. **Máquina para la resistencia a la ruptura**



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

3.6.4. Procedimiento para determinar la temperatura de inflamación de la madera plástica

Las pruebas para determinar la temperatura de inflamación se realizaron en el Laboratorio Multipropósito Sección de Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería con el siguiente procedimiento.

- Cortar una muestra de la madera plástica de 2 gramos.
- Colocarla en el crisol.
- Colocar en la plancha eléctrica.

- Calentar la muestra hasta una temperatura 15 ± 5 grados por debajo del punto estimado.
- Elevar la temperatura durante toda la prueba a una velocidad no menor a 1, ni mayor a 1,5 grados Celsius por minuto hasta que la muestra empiece a quemarse.
- Leer en el termómetro infrarrojo la temperatura a la cual la muestra empezó a quemarse observando la forma de combustión; si se quemó y se carboniza o se quema y se funde.

Se hizo una prueba con 2 gramos de aserrín de teca pasado por el tamiz 40 y retenido por el tamiz 60 para determinar la temperatura de inflamación del aserrín para estimar el valor al cual la madera plástica podría inflamarse ya que el polipropileno se descompone a 270 grados Celsius.

3.6.5. Procedimiento para determinar la densidad de la madera plástica

Para las pruebas de densidad de la madera plástica, a las piezas elaboradas de madera plástica se cortaron muestras rectangulares las cuales fueron medidas y posteriormente pesadas en el laboratorio de Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

- Limpiar cuidadosamente la pieza de madera plástica y asegurarnos de que este seca.
- Tarar la balanza.

- Pesar la pieza de madera plástica en la balanza.
- Medir el volumen de la pieza de madera plástica con el vernier.
- Calcular el valor de la densidad.

3.6.6. Procedimiento para determinar la dureza de la madera plástica

La dureza es la oposición que ofrecen los materiales a alteraciones como la penetración, la abrasión, el rayado, la cortadura, las deformaciones permanentes; entre otras. También puede definirse como la cantidad de energía que absorbe un material ante un esfuerzo antes de romperse o deformarse.

El método que se utilizó fue el de la resistencia que oponen los materiales a ser rayados por otros, las pruebas de dureza se realizaron en el laboratorio de Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

- Limpiar la pieza de madera plástica.
- Utilizar uno de los materiales de la tabla X para marcar una línea en el material empezando por el 1 hasta que quede marcada una línea en la pieza de madera plástica.
- El valor de la dureza se lee en la tabla de acuerdo al material que dejó una marca.

Tabla X. **Escala Mohs de dureza**

Mineral	Dureza	Observación
Talco	1	Se puede rayar fácilmente con la uña
Yeso	2	Es más difícil rayarlo con una uña
Calcita	3	Se puede rayar con una moneda de cobre
Fluorita	4	puede rayarse con un cuchillo
Apatita	5	Se puede rayar difícilmente con un cuchillo
Feldespató	6	Se puede rayar con el acero
Cuarzo	7	raya al acero
Topacio	8	Se raya con el corindón
Corindón	9	sólo se raya mediante diamante
Diamante	10	mineral natural más duro

Fuente: bibliografía núm. 11.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

En este apartado, se presenta como se tabularon, ordenaron y procesaron los datos de las pruebas físico-mecánicas realizadas a todas las piezas de madera plástica elaboradas en el Laboratorio Multipropósito Sección Tecnología de la Madera.

3.7.1. Ordenamiento de la información

En la fase experimental de esta investigación las variables recopiladas se ordenaron en tablas de acuerdo a que tipo de experimento correspondían. A continuación se presenta una muestra de las tablas utilizadas para la creación de las piezas de madera plástica y ordenamiento de la información.

Tabla XI. Creación de las piezas de madera plástica

Experimento E _{xx}		
Tiempo en el horno (minutos)	Presión de compresión Toneladas	Temperatura del horno (°C)
35		
45		
55		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. Resultados de las diferentes pruebas

	Tiempo en el horno (minutos)	Densidad (g/cm ³)	Temperatura de inflamación (°C)	Dureza escala Mohs Dureza	Módulo de ruptura (kg/cm ²)
Experimento E _{xx}	35				
	45				
	55				
	35				
	45				
	55				
	35				
	45				
	55				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Cálculo de la media aritmética**

	MEDIA ARITMÉTICA			
	Densidad (g/cm ³)	Temperatura de inflamación (°C)	Dureza escala Mohs	Módulo de ruptura (kg/cm ²)
Experimento E ₁₁				
Experimento E ₁₂				
Experimento E ₁₃				
Experimento E ₂₁				
Experimento E ₂₂				
Experimento E ₂₃				
Experimento E ₃₁				
Experimento E ₃₂				
Experimento E ₃₃				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Cálculo del rango**

	RANGO			
	Densidad (g/cm ³)	Temperatura de inflamación (°C)	Dureza escala Mohs	Módulo de ruptura (kg/cm ²)
Experimento E ₁₁				
Experimento E ₁₂				
Experimento E ₁₃				
Experimento E ₂₁				
Experimento E ₂₂				
Experimento E ₂₃				
Experimento E ₃₁				
Experimento E ₃₂				
Experimento E ₃₃				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. Cálculo de la varianza

	VARIANZA			
	Densidad (g/cm ³)	Temperatura de inflamación (°C)	Dureza escala Mohs	Módulo de ruptura (kg/cm ²)
Experimento E ₁₁				
Experimento E ₁₂				
Experimento E ₁₃				
Experimento E ₂₁				
Experimento E ₂₂				
Experimento E ₂₃				
Experimento E ₃₁				
Experimento E ₃₂				
Experimento E ₃₃				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. Cálculo de la desviación estándar

	DESVIACIÓN ESTÁNDAR			
	Densidad (g/cm ³)	Temperatura de inflamación (°C)	Dureza escala Mohs	Módulo de ruptura (kg/cm ²)
Experimento E ₃₁				
Experimento E ₁₂				
Experimento E ₁₃				
Experimento E ₂₁				
Experimento E ₂₂				
Experimento E ₂₃				
Experimento E ₃₁				
Experimento E ₃₂				
Experimento E ₃₃				

Fuente: elaboración propia.

3.7.2. Procesamiento de la información

Los resultados obtenidos en la evaluación de las propiedades físico-mecánicas de las pruebas realizadas a las piezas de madera plástica, se reportarán en tablas y gráficas para el análisis y comparación de los resultados.

3.7.2.1. Determinación de la densidad

La densidad es una propiedad que expresa la cantidad de masa de un objeto por una unidad de volumen, los valores de densidad se midieron a todas las piezas de madera plástica, midiendo sus dimensiones para calcular su volumen para luego utilizar la ecuación siguiente.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

[Ecuación no.1, Referencia no.4]

Donde:

ρ =densidad [g/cm³]

m=masa [g]

V= volumen [cm³]

3.7.2.2. Determinación del esfuerzo máximo de flexión

El esfuerzo máximo de flexión o módulo de ruptura, se determina a partir de la carga máxima soportada por el espécimen en el ensayo de flexión midiendo la distancia entre los apoyos y el espesor del espécimen a ensayar y el ancho de la pieza de madera plástica a ensayar.

$$R = \frac{3PL}{2bd^2}$$

[Ecuación no. 2, Referencia no. 10]

Donde:

R= módulo de ruptura o flexión [kg/cm²]

P= carga o esfuerzo de ruptura [kg]

L= distancia entre los apoyos [cm]

b= ancho efectivo del espécimen [cm]

d= espesor efectivo del espécimen [cm]

3.8. Análisis estadístico

El análisis estadístico que se utilizó en esta investigación, consiste en calcular la media aritmética, desviación estándar y el rango de las propiedades físico-mecánicas para utilizar un análisis de variabilidad.

3.8.1. Media aritmética

Para cada experimento, se determinará la media de los 9 datos pertenecientes a cada experimento, para comparar los valores entre los experimentos y encontrar cual de las variables afecta más las propiedades.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{N}$$

[Ecuación no.3, Referencia No.14]

Donde:

\bar{X} = Media aritmética

x_i = Valor de cada corrida

N= Número de corridas por tratamiento

3.8.2. Análisis de variabilidad

Se empleo un análisis estadístico de variabilidad para conocer cuan dispersos son los resultados y poder cuantificar si existe alguna variación de las propiedades de la madera plástica al cambiar las condiciones y determinar cuál es el valor que más efecto tiene en los resultados, las estadísticas más importantes para medir la variabilidad de una muestra aleatoria son: el rango, la varianza y la desviación estándar.

El rango de una muestra aleatoria X_1, X_2, \dots, X_n se define como la estadística $X_{(n)} - X_{(1)}$, donde $X_{(n)}$ y $X_{(1)}$, son, respectivamente las observaciones más grandes y más pequeñas en la muestra y nos dice que tan grande es el intervalo que abarcan los datos pero no dice nada de los valores intermedios para esto se utilizara la varianza que considera la posición de cada observación en relación con la media de la muestra y se define como.

Si X_1, X_2, \dots, X_n representa una muestra aleatoria de tamaño n , entonces la varianza de la muestra se define como la estadística.

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X)^2}{n-1}$$

[Ecuación no.4, Referencia No.14]

Donde:

n = número de datos

X_i = cada valor

X = media aritmética de los valores

S^2 = varianza de la muestra

La desviación estándar de la muestra se denota con S y es la raíz cuadrada positiva de la varianza de la muestra.

3.8.3. Factores experimentales

Son las variables que se modificaron en la creación de las piezas de madera plástica, para poder obtener los mejores parámetros para la creación de piezas de madera plástica.

- Porcentaje de mezcla (40, 50 y 60)
- Tiempo de residencia en el horno (35, 45 y 55 minutos)
- Temperatura del horno 140, 160 y 180 grados Celsius
- Presión de compresión

3.8.4. Factores respuesta

Son las propiedades físico-mecánicas que se querían comparar para ver el efecto que causan los factores experimentales en estas propiedades, evaluando su variación y desviación y rango en los datos.

- Dureza
- Densidad
- Módulo de ruptura
- Temperatura de ignición

Con estos factores se determinó los resultados siguientes:

- Los parámetros adecuados para la fabricación de madera plástica (porcentaje de mezcla, temperatura, tiempo y presión).

- Determinar si existe variación de las propiedades físico mecánicas de la madera plástica al variar el porcentaje de la mezcla y temperatura en el horno.

3.9. Plan de análisis de los resultados

Para el análisis de los resultados, se dividieron por objetivos específicos para poder interpretar adecuadamente y poder concluir de acuerdo a lo estipulado en el objetivo general y en los específicos.

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

- Objetivo específico núm. 1:

Establecer la formulación adecuada de mezclado, de piezas de madera plástica con partículas de aserrín, pasadas por el tamiz número 40 y retenido por el tamiz número 60 utilizando como aglutinante polipropileno.

El porcentaje se determinó comparando los resultados de las demás variables de las 81 piezas de madera plástica elaboradas y fue el que presento los valores más altos en todas las pruebas: dureza, resistencia a la ruptura y temperatura de inflamación.

- Objetivo específico núm. 2:

Establecer el tiempo de residencia de las piezas de madera plástica en el horno eléctrico.

El tiempo se determinó comparando los resultados y fue el tiempo más corto que obtuvo los mejores resultados en las pruebas de dureza, resistencia a la ruptura y temperatura de inflamación.

- Objetivo específico núm. 3:
Establecer la temperatura de horneado de las piezas de madera plástica.

La temperatura de horneado se determinó comparando los resultados y fue la temperatura más baja que obtuvo los mejores resultados en las pruebas de dureza, fuerza de ruptura y temperatura de inflamación.

Tabla XVII. Comparación de los resultados

	Variables de operación			Variables a comparar				
	Mezcla	Temperatura (°C)	Presión Ton.	Tiempo en el horno minutos	Densidad (g/cm ³)	Temperatura de inflamación (°C)	Dureza escala Mohs	Módulo de ruptura (kg/cm ²)
1	60 % de aglutinante 40 % de aserrín	140	6	35				
2		140	6	45				
3		140	6	55				
4		140	4	35				
5		140	4	45				
6		140	4	55				
7		140	2	35				
8		140	2	45				
9		140	2	55				
10		160	6	35				
11		160	6	45				
12		160	6	55				
13		160	4	35				
14		160	4	45				
15		160	4	55				
16		160	2	35				
17		160	2	45				
18		160	2	55				
19		180	6	35				
20		180	6	45				
21		180	6	55				
22		180	4	35				
23		180	4	45				
24		180	4	55				
25		180	2	35				
26		180	2	45				
27		180	2	55				

Continuación de la tabla XVII.

	Variables de operación				Variables a comparar			
	Mezcla	Temperatura (°C)	Presión Ton.	Tiempo en el horno minutos	Densidad (g/cm ³)	Temperatura de inflamación (°C)	Dureza escala Mohs	Módulo de ruptura (kg/cm ²)
28	50 % de aglutinante 50 % de aserrín	140	6	35				
29		140	6	45				
30		140	6	55				
31		140	4	35				
32		140	4	45				
33		140	4	55				
34		140	2	35				
35		140	2	45				
36		140	2	55				
37		160	6	35				
38		160	6	45				
39		160	6	55				
40		160	4	35				
41		160	4	45				
42		160	4	55				
43		160	2	35				
44		160	2	45				
45		160	2	55				
46		180	6	35				
47		180	6	45				
48		180	6	55				
49		180	4	35				
50		180	4	45				
51		180	4	55				
52		180	2	35				
53		180	2	45				
54		180	2	55				

Continuación de la tabla XVII.

	Variables de operación			Variables a comparar				
	Mezcla	Temperatura (°C)	Presión Ton.	Tiempo en el horno minutos	Densidad (g/cm ³)	Temperatura de inflamación (°C)	Dureza escala Mohs	Módulo de ruptura (kg/cm ²)
55	40 % de aglutinante 60 % de aserrín	140	6	35				
56		140	6	45				
57		140	6	55				
58		140	4	35				
59		140	4	45				
60		140	4	55				
61		140	2	35				
62		140	2	45				
63		140	2	55				
64		160	6	35				
65		160	6	45				
66		160	6	55				
67		160	4	35				
68		160	4	45				
69		160	4	55				
70		160	2	35				
71		160	2	45				
72		160	2	55				
73		180	6	35				
74		180	6	45				
75		180	6	55				
76		180	4	35				
77		180	4	45				
78		180	4	55				
79		180	2	35				
80		180	2	45				
81		180	2	55				

Fuente: elaboración propia.

3.9.2. Programas a utilizar para el análisis de datos

Se utilizó Microsoft Excel 2007, para la generación y análisis de datos (estadísticos y resultados), por su amplia aplicación en el manejo de datos numéricos, ya que cuenta con la posibilidad de realizar una hoja de cálculo y realizar los análisis estadísticos que se pretenden realizar en esta investigación y Microsoft Word para la elaboración del informe final.

3.10. Manejo de los desechos

Los residuos que son el producto que queda arriba del tamiz 40 y lo que pasa del 60 al ser solo aserrín se maneja de acuerdo a los procedimientos del laboratorio Multipropósito de Sección de Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

4. RESULTADOS

4.1. Caracterización de la materia prima

Este apartado se refiere a la caracterización de la materia prima utilizada, el aserrín de la especie arbórea Teca y del aglutinante polipropileno para la elaboración de las piezas de madera plástica.

Tabla XVIII. **Caracterización del aserrín de la especie arbórea Teca y el polímero polipropileno**

Aserrín	
Diámetro de partícula	0,375 y 0,246 milímetros
Porcentaje del diámetro en el aserian	30 %
Temperatura de inflamación aserrín	280 °C
Temperatura de inflamación madera	330 °C
Humedad relativa	12 %
Polipropileno	
Diámetro de partícula	¹ / ₁₀ Pulgada
Temperatura de inflamación	Se degrada a más de 280 °C
Temperatura de fusión	160 °C
Densidad	3,05 g/cm ³

Fuente: elaboración propia.

4.2. Propiedades físico-mecánicas de las piezas de madera plástica

En este apartado se presentan las propiedades físico-mecánicas de las piezas de madera plástica que se determinaron: densidad, temperatura de inflamación, módulo de ruptura y dureza.

Tabla XIX. Pruebas no exitosas

Experimento E ₁₁	El material no se fundió
Experimento E ₂₁	El material no se fundió
Experimento E ₃₁	El material se fundió parcialmente

Fuente: elaboración propia.

Figura 11. Piezas de madera no exitosas



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

Tabla XX. **Experimentos realizados exitosamente**

Experimento E ₁₂	Todas las piezas de madera plástica se crearon.
Experimento E ₁₃	Todas las piezas de madera plástica se crearon.
Experimento E ₂₂	Todas las piezas de madera plástica se crearon.
Experimento E ₂₃	Todas las piezas de madera plástica se crearon.
Experimento E ₃₂	Todas las piezas de madera plástica se crearon.
Experimento E ₃₃	Todas las piezas de madera plástica se crearon.

Fuente: elaboración propia.

Figura 12. **Piezas de madera plásticas elaboradas**

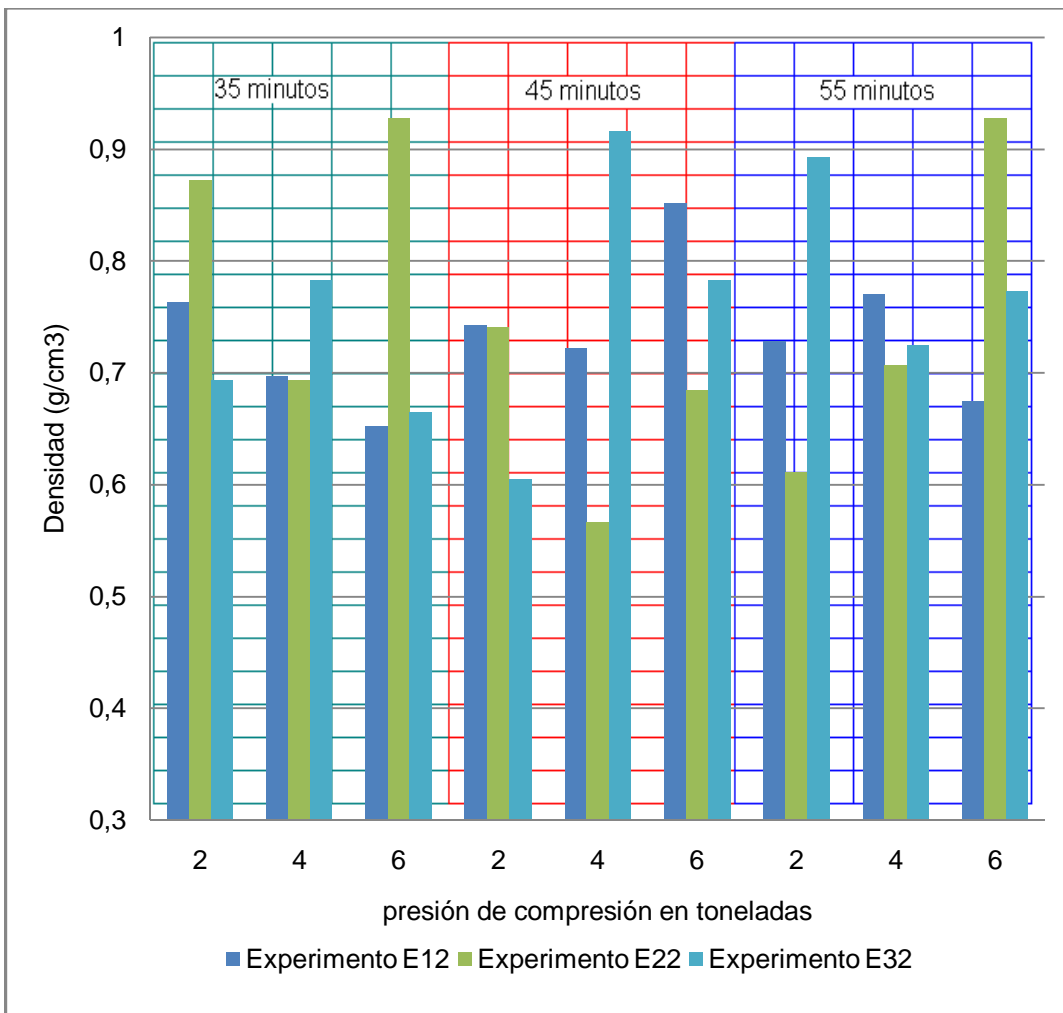


Fuente: Laboratorio Multipropósito de Sección de Tecnología de la Madera. CII. USAC.

4.2.1. Densidad

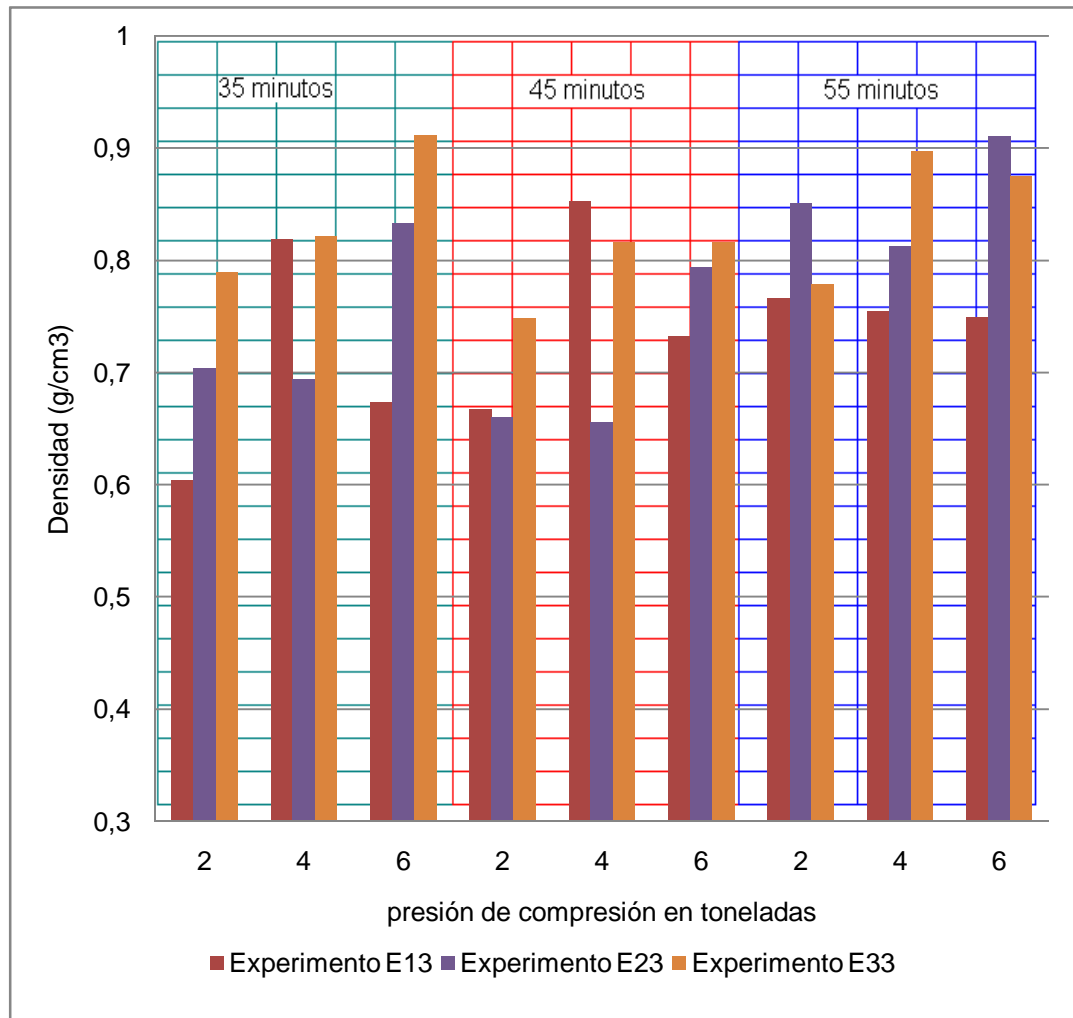
Se presenta la relación gráfica de densidad de las piezas de madera plástica, creadas para cada uno de los experimentos divididos en 2 gráficas de acuerdo a la temperatura de elaboración en el horno.

Figura 13. **Densidad de las piezas de madera plástica elaboradas a 160 °C**



Fuente: elaboración propia.

Figura 14. **Densidad de las piezas de madera plástica elaboradas a 180 °C**

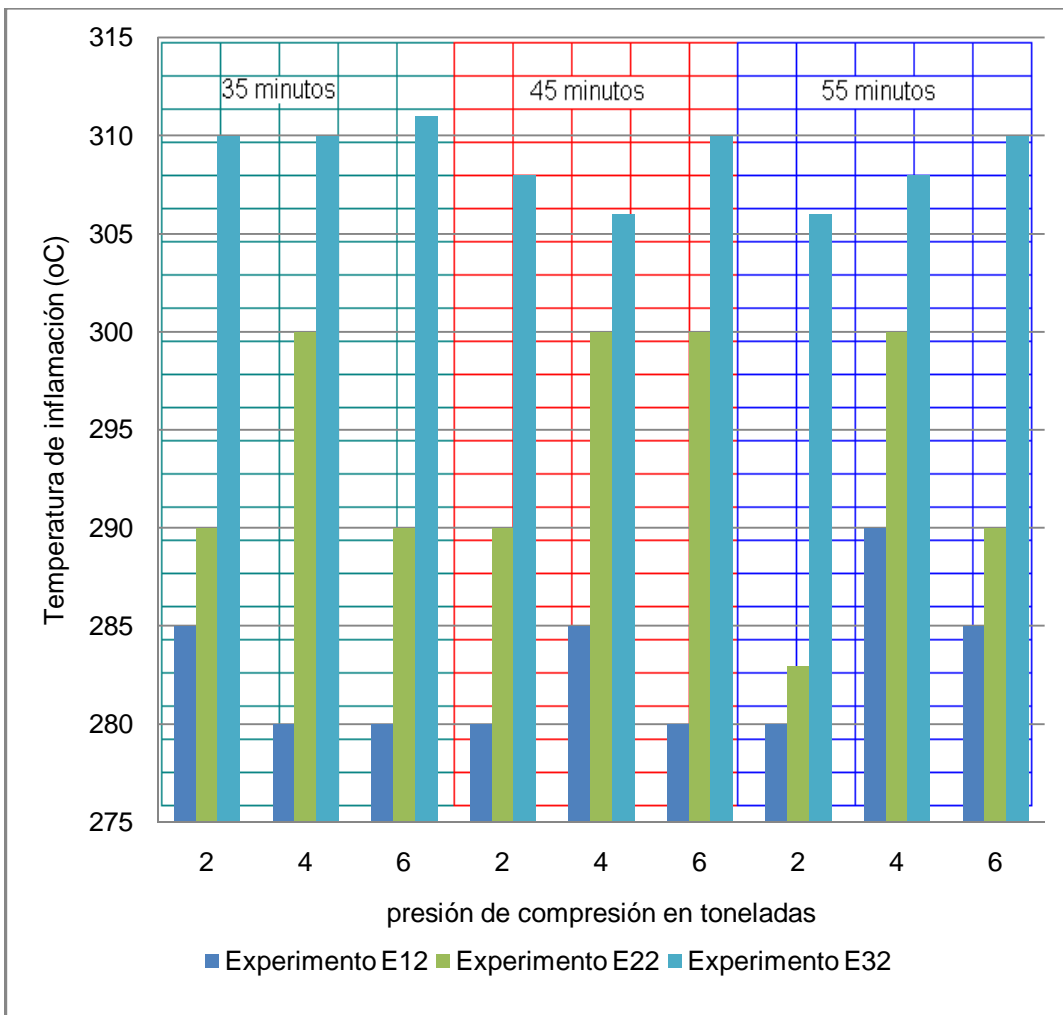


Fuente: elaboración propia.

4.2.2. Temperatura de inflamación

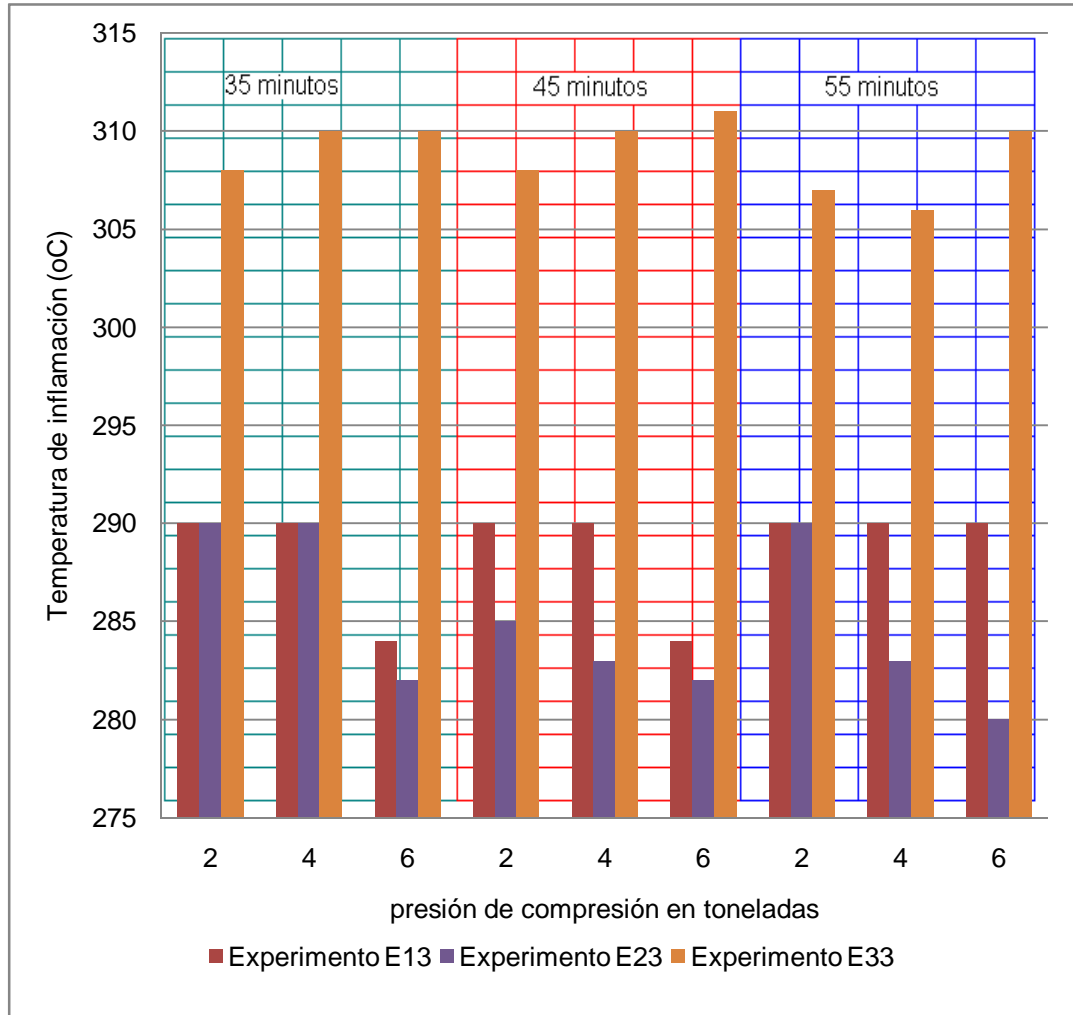
Se presenta la relación gráfica de los diferentes valores de temperatura de inflamación para cada uno de los experimentos, divididos en 2 gráficas de acuerdo a la temperatura de elaboración en el horno.

Figura 15. **Temperatura de inflamación de las piezas de madera plástica elaboradas a 160 °C**



Fuente: elaboración propia.

Figura 16. **Temperatura de inflamación de las piezas de madera plástica elaboradas a 160 °C**

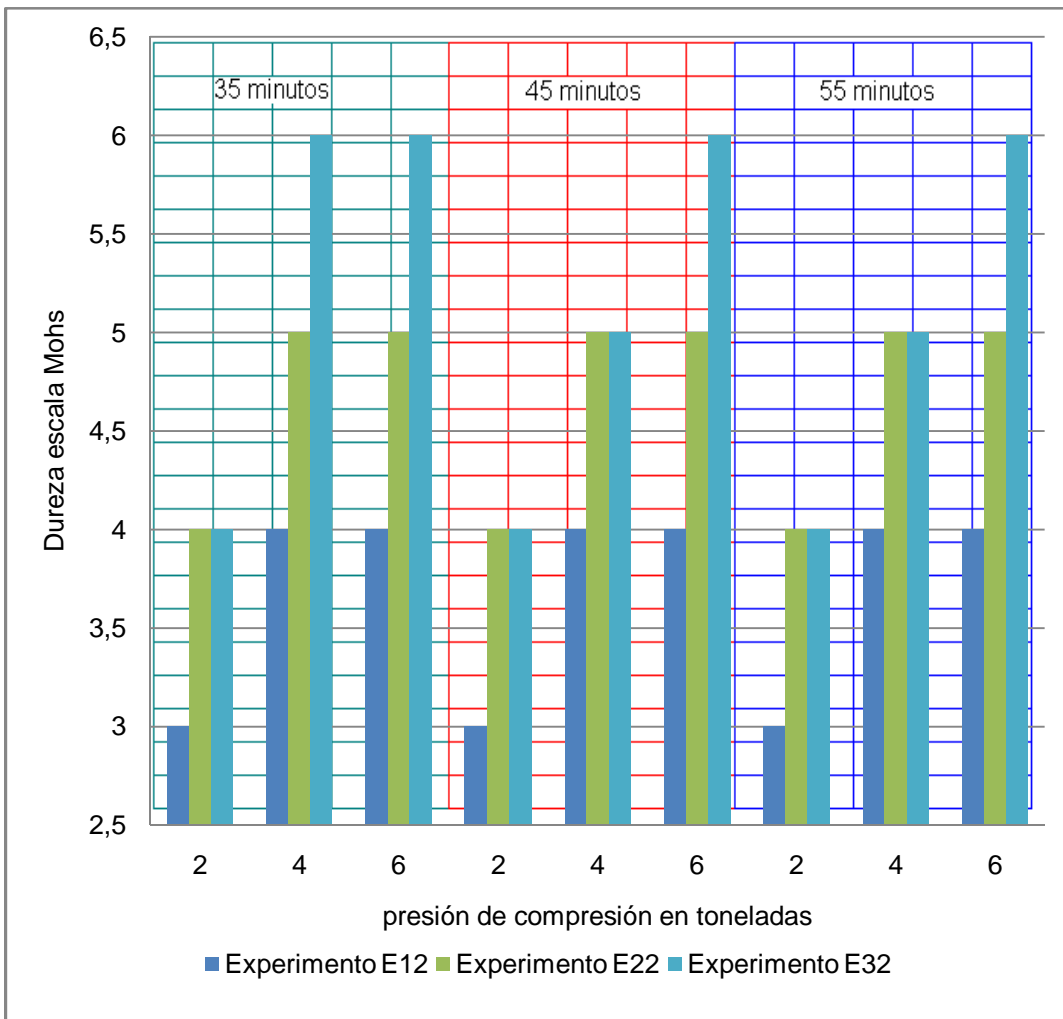


Fuente: elaboración propia.

4.2.3. Dureza

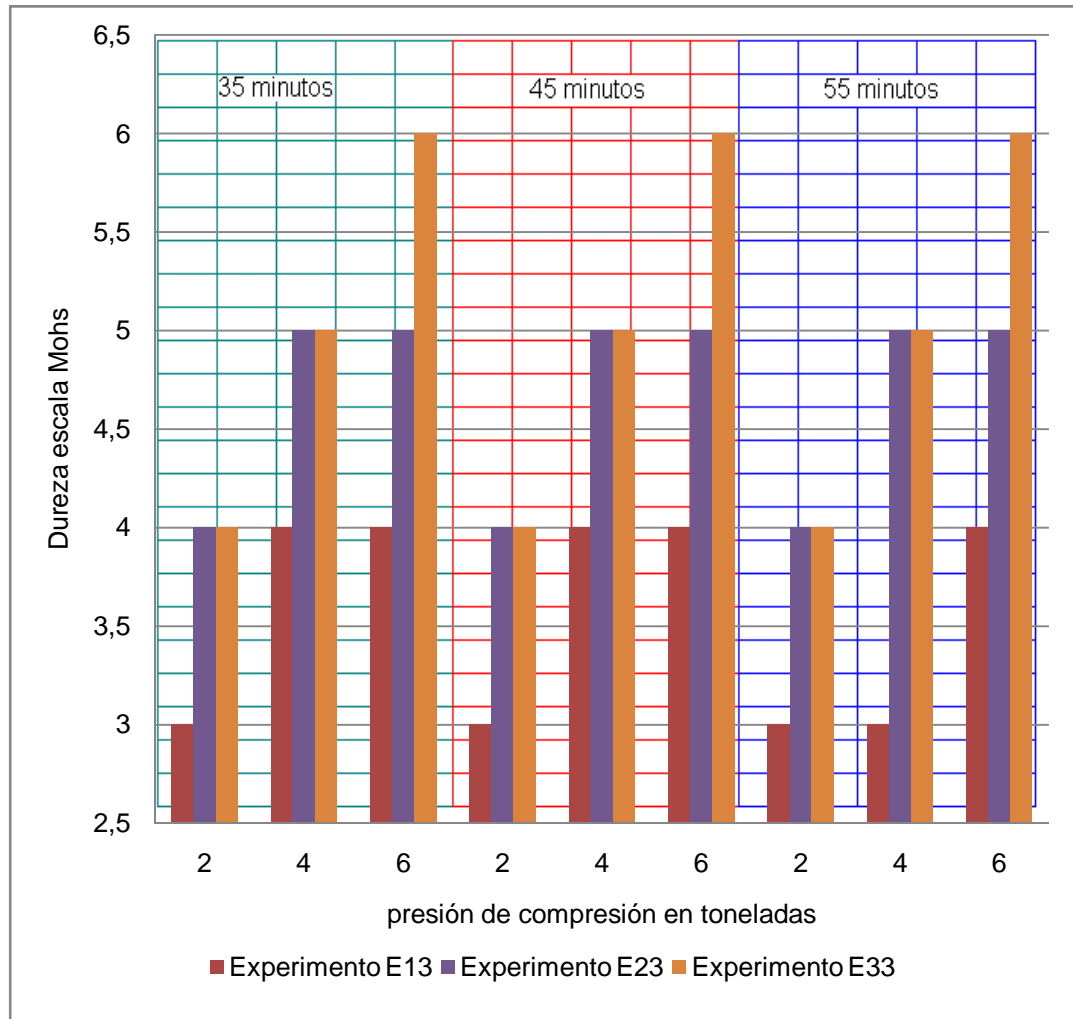
Se presenta la relación gráfica de los valores de la propiedad de dureza en la escala Mohs, para cada uno de los experimentos divididos en 2 gráficas de acuerdo a la temperatura de elaboración en el horno.

Figura 17. **Dureza de las piezas de madera plástica elaboradas a 160 °C**



Fuente: elaboración propia.

Figura 18. Dureza de las piezas de madera plástica elaboradas a 180 °C

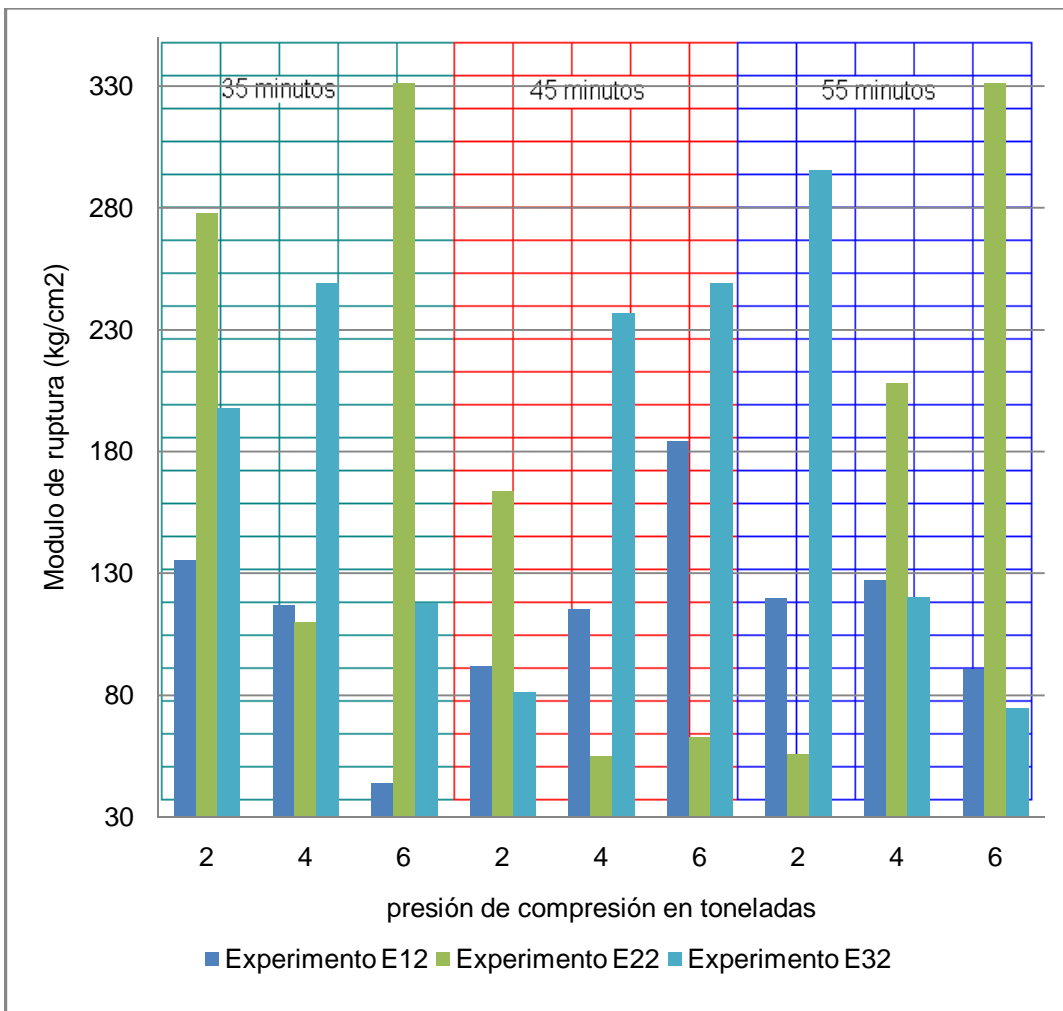


Fuente: elaboración propia.

4.2.4. Módulo de ruptura

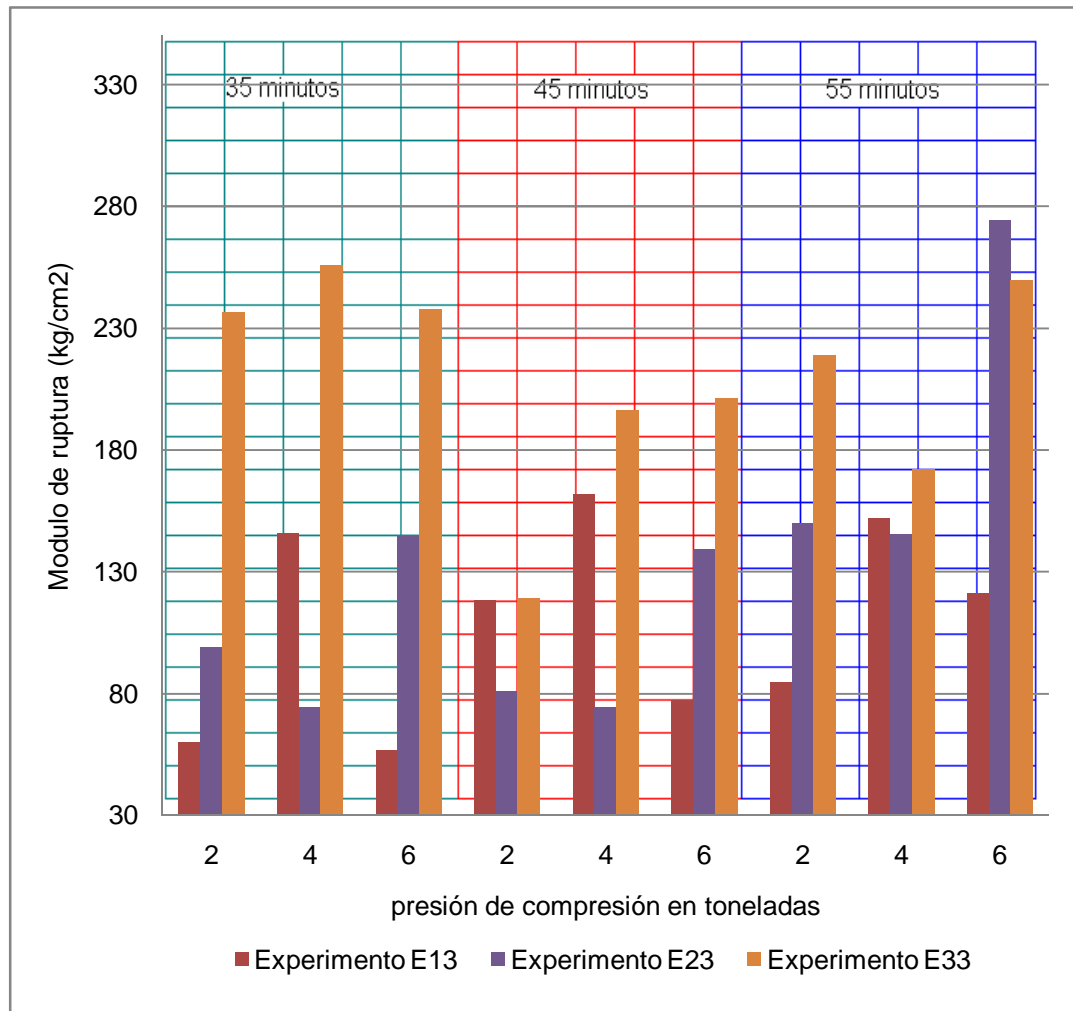
Se presenta la relación gráfica del módulo de ruptura o esfuerzo del ensayo de flexión estática, para cada uno de los experimentos divididos en 2 gráficas de acuerdo a la temperatura de elaboración en el horno.

Figura 19. **Módulo de ruptura de las piezas de madera plástica elaboradas a 160 °C**



Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Módulo de ruptura de las piezas de madera plástica elaboradas a 180 °C**



Fuente: elaboración propia.

4.3. Variación de las propiedades físico-mecánicas de las piezas de madera plástica

En esta sección se presentan los datos de la media aritmética, rango y variación de los valores de las propiedades físico-mecánicas de las pruebas realizadas a las piezas de madera plástica creadas comparándolas por experimento.

4.3.1. Media aritmética de las propiedades físico-mecánicas de las piezas de madera plástica

Este apartado, contiene los valores de la media aritmética de las propiedades físico-mecánicas realizadas a las piezas de madera plástica creadas agrupadas de acuerdo al tipo de experimento para compararlas.

Tabla XXI. Media aritmética

	MEDIA ARITMÉTICA			
	Densidad (g/cm ³)	Temperatura de inflamación (°C)	Dureza escala Mohs	Módulo de ruptura (kg/cm ²)
Experimento E ₁₂	0,7339	282,77	3,6666	113,92
Experimento E ₁₃	0,7356	288,66	3,5555	108,62
Experimento E ₂₂	0,7309	293,22	4,6666	164,93
Experimento E ₂₃	0,7685	285,00	4,6666	131,39
Experimento E ₃₂	0,7432	308,55	5,0000	173,20
Experimento E ₃₃	0,8285	308,88	5,0000	209,73

Fuente: elaboración propia.

4.3.2. Rango de las propiedades físico-mecánicas de las piezas de madera plástica

Este apartado, contiene los rangos que abarcan los resultados de las propiedades físico-mecánicas realizadas a las piezas de madera plástica ordenadas por experimento para compararlas.

Tabla XXII. Rango

	RANGO			
	Densidad (g/cm ³)	Temperatura de inflamación (°C)	Dureza escala Mohs	Módulo de ruptura (kg/cm ²)
Experimento E ₁₂	0,1999	10	1	140,62
Experimento E ₁₃	0,2481	6	1	104,84
Experimento E ₂₂	0,3615	17	1	276,24
Experimento E ₂₃	0,2545	10	1	200,01
Experimento E ₃₂	0,3110	5	2	220,70
Experimento E ₃₃	0,1627	5	2	136,80

Fuente: elaboración propia.

4.3.3. Desviación estándar de las propiedades físico-químicas de las piezas de madera plástica

Este apartado, contiene los valores de la desviación estándar de las propiedades físico-mecánicas de las piezas de madera plástica creadas, ordenadas por experimento para compararlas.

Tabla XXIII. **Desviación estándar**

	DESVIACIÓN ESTÁNDAR			
	Densidad (g/cm³)	Temperatura de inflamación (°C)	Dureza escala Mohs	Módulo de ruptura (kg/cm²)
Experimento E ₁₂	0,0589	3,6324	0,5000	38,077
Experimento E ₁₃	0,0866	2,6457	0,5270	40,168
Experimento E ₂₂	0,1153	6,8150	0,5000	101,647
Experimento E ₂₃	0,0921	3,9686	0,5000	62,601
Experimento E ₃₂	0,1089	1,8104	0,8660	78,664
Experimento E ₃₃	0,0554	1,6914	0,8660	43,577

Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Las piezas de madera plástica fueron elaboradas utilizando 3 formulaciones distintas 40, 50 y 60 por ciento en peso de polipropileno, con 3 tiempos distintos en horno, 35, 45 y 55 minutos a 140, 160 y 180 grados Celsius sometidas a 2, 4 y 6 toneladas de presión de compresión creando un total de 81 piezas de madera plástica distintas.

Como se observa en las tablas XIX y XX, 3 experimentos dieron resultados negativos donde las 27 piezas de madera plástica no se pudieron crear, la temperatura del horno estaba a 140 grados Celsius y el material no llegaba a fundirse lo suficiente para poder funcionar como un aglutinante, mostrando el mismo comportamiento en las tres formulaciones utilizadas ya que el polipropileno funde exactamente a 160 grados Celsius, no es posible utilizarlo a temperaturas bajo ni cercanas al punto de fusión del polipropileno, la hipótesis es rechazada en estos experimentos.

Las piezas de madera plástica que se pudieron crear fueron 54 las cuales entran en los experimentos donde la temperatura que se uso en el horno fue de 160 y 180 grados Celsius, dando diferentes resultados en las pruebas de acuerdo a los demás variables, el factor más importante que se observo al variar la temperatura es que las 27 piezas de madera plástica creadas a 160 grados Celsius tienen un mejor aspecto que las 27 a mayor temperatura y la influencia que tiene en el tiempo de horneado al aumentar la temperatura la penetración de calor es mejor y se reduce el tiempo en el horno, la hipótesis es aceptada en estos 6 experimentos.

A las piezas de madera plásticas obtenidas se les evaluó el efecto que causa el cambio en la proporción de aglutinante, el tiempo en el horno, la temperatura en el horno y la carga de compactación sobre las propiedades físicas establecidas: densidad, temperatura de inflamación, así como sobre las propiedades mecánicas esfuerzo máximo de flexión y dureza.

Los resultados de las pruebas de densidad, temperatura de inflamación, dureza y módulo de ruptura se graficaron en pares de gráficas divididas de acuerdo a la temperatura en el horno siendo la primera de 160 y la segunda de 180 grados Celsius, utilizando gráficas de barras ya que cada dato representa un valor discreto de cada pieza de madera plástica elaborada, por lo que no es posible utilizar un análisis de tendencia de los datos.

Cada gráfica esta dividida en 3 zonas diferentes que representan los 3 diferentes tiempos de horneado de las piezas de madera plástica 35, 45 y 55 minutos y a su vez están ordenados los datos en triadas que representan las diferentes formulaciones evaluadas 40, 50 y 60 por ciento de aserrín en peso, colocando en la abscisa las presiones de compresión a las cuales fueron sometidas las piezas de madera plástica y en la ordenada el valor de la propiedad citada.

Los resultados de la prueba de densidad de las piezas de madera plástica se observan en la figura 13 y 14 muestran un comportamiento parecido para cada experimento, teniendo valores más bajos de densidad a menor carga de compactación y valores más altos para cargas más altas ya que al estar sujeta la mezcla a mayor presión se compactan mejor las partículas del aserrín con el polipropileno, los valores más altos entre las piezas de madera plástica a una misma temperatura y presión de carga se obtuvieron a la formulación de 40 por ciento de polipropileno con un valor medio de 0,828 gramos por centímetro

cúbico y los valores más bajos se obtuvieron con la formulación de 60 por ciento de polipropileno con un valor medio de 0,698 gramos por centímetro cúbicos.

La influencia de la temperatura y el tiempo de horneado en la densidad no es significativa ya que los resultados entre las misma formulación y presión presentan el mismo comportamiento, a mayor temperatura el rango de los datos es menor y la desviación de los datos también disminuye con lo descrito anteriormente se puede observar que las 4 variables proporcionan una variación en la densidad.

Para la prueba de la temperatura de inflamación, figura 15 y 16 se aprecia una variación de la temperatura solo en función de la formulación de aglutinante y las demás variables temperatura de horneado tiempo en el horno y carga de compactación no modifican la temperatura de inflamación. La temperatura solo depende de la cantidad de aserrín presente en la formulación, la mayor temperatura media fue de 308 grados en la formulaciones de 40 por ciento de aserrín y 282 en las formulaciones de 60 por ciento de aserrín, porque la temperatura de inflamación depende del aserrín teniendo una temperatura de inflamación de 280 y el polipropileno se descompone a temperaturas mayores a los 270 grados Celsius.

Cuando las muestras de madera plástica alcanzan los 250 grados Celsius se empieza a derretir y a desprender humo conforme se acercan a la temperatura de descomposición la emisión de gases aumenta hasta que llega a la temperatura de inflamación al aumentar la cantidad de aserian la forma como se quemaban las muestras cambia mostrando una llama más estable y duradera, al aumentar el aserrín quemándose como un pedazo de madera solida y generando una braza.

Los resultados de la prueba de dureza se leen en la figura 17 y 18, mostrando un aumento de la dureza al aumentar la proporción de aglutinante con una variación entre las curvas de la misma proporción por la influencia de la presión de compresión, al aumentar el polipropileno la dureza se acerca más a la del material puro y al estar sometido a mayor presión se compacta mejor el material y se forma una mejor matriz aglutinante fibra, la temperatura y tiempo de horneado no influye sobre la dureza de las piezas de madera plástica teniendo el valor medio de 5 en la escala Mohs de dureza la formulación de 60 por ciento de polipropileno y 3,666 para la formulación de 40 por ciento de polipropileno.

Los resultados de la prueba del módulo de ruptura se presentan en la figura 19 y 20, se puede observar que los datos tienen la misma tendencia de acuerdo a la formulación y temperatura de horneado, el módulo de ruptura aumenta al incrementar la proporción de aglomerante. Este efecto indica que a mayor proporción de aglomerante, las fibras se encuentran más amarradas por lo que son más flexibles luego se observa que disminuye al aumentar la proporción ya que el material se vuelve más rígido.

Las piezas de madera plástica elaboradas con polipropileno y aserrín de teca que presentaron las mejores propiedades físico-mecánicas corresponden a los elaborados con 50 por ciento de aglomerante, 260 grados Celsius y 45 minutos en el horno, ya que la formulación de 60 por ciento de aglomerante tienen valores altos en dureza pero mayor densidad, temperatura alta de inflamación y módulo de rupturas medios, y los que tiene densidades menores tiene valores de ruptura menores y temperaturas de inflamaciones más bajas y tiempo en horno más altos.

CONCLUSIONES

1. La hipótesis planteada y la hipótesis estadística alternativa es aceptada ya que es posible utilizar el polipropileno como un agente aglutinante con una fibra vegetal para producir madera plástica.
2. La proporción de aglutinante utilizada en las piezas de madera plástica que presentaron las mejores propiedades físico-mecánicas fue la de 50 por ciento obteniendo el valor medio en todas las pruebas y el valor más alto en el módulo de ruptura.
3. La formulación aglutinante fibra fue la variable con mayor efecto significativo en las diferencias de todas las propiedades físico-mecánicas en las piezas de madera plástica.
4. La variable que más influyó sobre la densidad de las piezas de madera plástica, fue la presión de compactación y en menor medida por la temperatura y tiempo de horneado, al aumentar el contenido de aserrín la densidad aumenta.
5. La temperatura de inflamación solo se vio afectada por la formulación de las piezas de madera plástica, al aumentar el contenido de aserrín la temperatura se acerca más a la temperatura de inflamación del aserrín.
6. La dureza fue afectada por la formulación de las piezas de madera plástica y la presión de compresión, al aumentar el contenido de plástico la dureza aumento.

7. El tiempo de horneado fue la variable que menos efecto tuvo sobre las propiedades físico-químicas.

8. Las piezas de madera plástica que presentaron las mejores propiedades físico-mecánicas corresponden a los elaborados a 160 grados Celsius y 45 minutos en el horno y 4 toneladas de presión.

RECOMENDACIONES

1. No utilizar presiones de compresión mayores a 10 toneladas ya que el material tiende a deslizarse por las fisuras del molde lo que provoca que las piezas de madera plástica no sean uniformes.
2. No someter las piezas de madera plástica a temperaturas del horno mayores de 190 Celsius, debido a que el aserrín se empieza a quemar y las piezas de madera plásticas salen oscuras.
3. Al calentar el molde junto con el material se reducen los tiempos en el horno.
4. Realizar un estudio utilizando un termoplástico con una temperatura de fusión menor a la del polipropileno y un material reciclado para comparar los resultados y determinar cuál es más factible.
5. Realizar un estudio de segregación de sólidos para analizar si existe segregación de partículas, al aplicarle presión a una mezcla de plástico con aserrín.
6. Al aumentar la temperatura el tiempo de horneado disminuye, pero el tiempo de horneado no tiene ningún efecto sobre las propiedades físico-químicas.

BIBLIOGRAFÍA

1. CASTEJON, GUERRA, Ovidio. *Análisis teórico práctico de vigas compuestas de madera corriente y madera contrachapeada (Plywood)*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1969. 133 p.
2. FLOREZ, Laura. *Madera plástica presente y futuro*. Disponible en <www.plastico.com> [Consulta: noviembre de 2012].
3. HARPER, Charles A. *Manual de plásticos*. Tom. 1. México: McGraw-Hill Interamericana, 2004. 1052 p.
4. MCCABE, WARREN, Julian C; SMITH, Peter H. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. 7ª. ed. México: McGraw-Hill, 2007. 1211 p.
5. MINK, Walter. *El plástico en la industria: tratado práctico*. Tom. 1. México: Editorial Gustavo Gilli, 1990. 223 p.
6. MURALLES, REYES, Samuel Manolo. *Caracterización Química de la madera de la especie Teca (Tectona grandis L.f.)*. Trabajo de graduación de Ing. Químico. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2008. 109 p.
7. NEOTURE, S.L; *Compuestos de madera y plásticos*. Copyright © 2010 Disponible en <<http://www.neoture.es/es/noticias/productos->

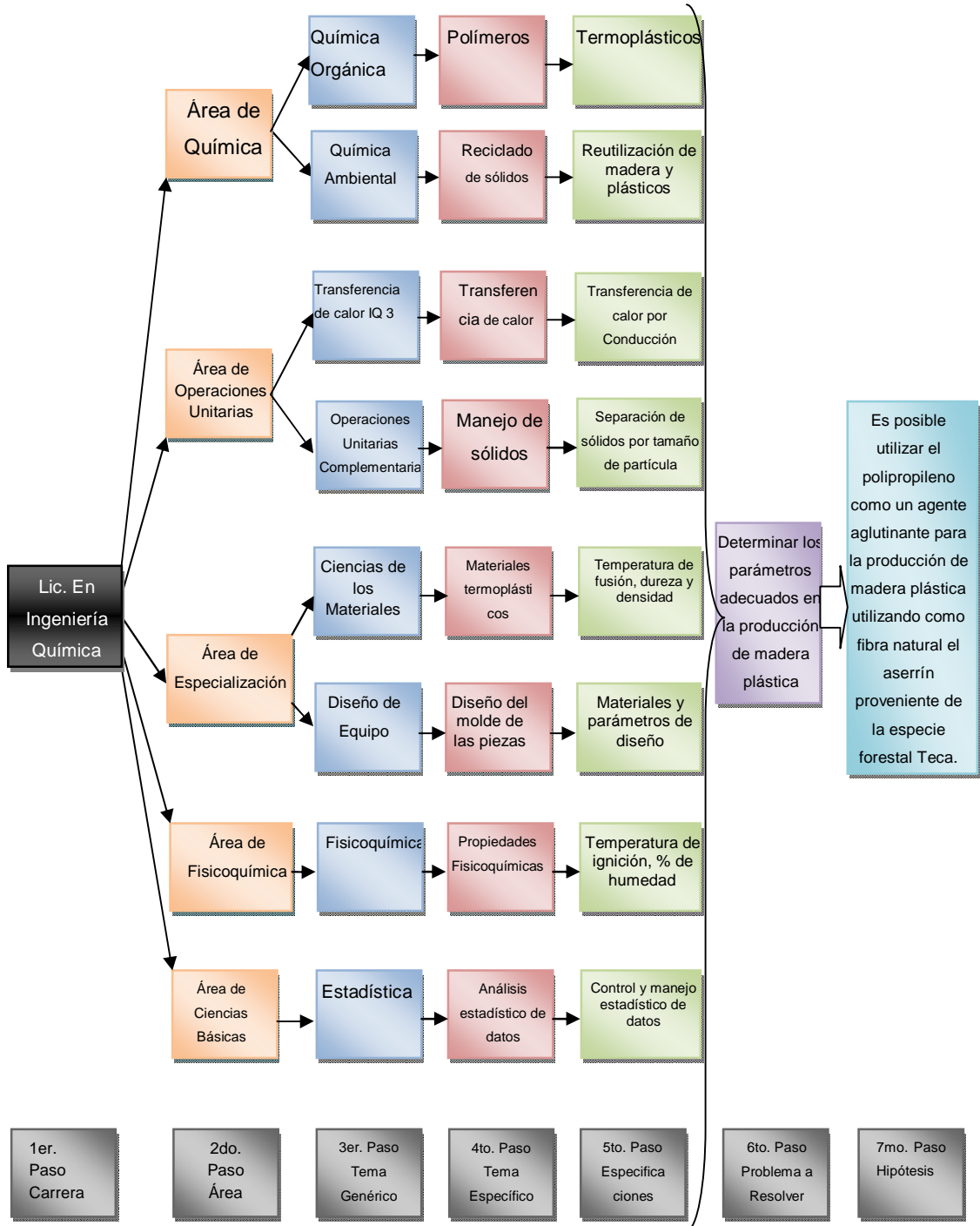
reciclad/145-compuesto-de-madera-y-plastico.htm> [Consulta: noviembre de 2012].

8. OBTESOL. *Termino plásticos, Observatorio tecnológico de la soldadura*. Disponible en <http://www.obtesol.es/index2.php?option=com_content&do_pdf=1&id=176> [Consulta: noviembre de 2012].
9. OYARZUN, Patricia. *Estudio de compuestos plástico madera: desarrollo de una metodología de evolución de la adhesión interfacial*. Universidad del Bio-Bio Concepción Chile. Disponible en <<http://www.scielo.cl/scieloOrg/php/articleXML.php?pid=S0718-221X2003000100009&lang=es>> [Consulta: noviembre de 2012].
10. PÉREZ MÉNDEZ, Emerson Víctor Manuel. *Análisis de las propiedades físico mecánicas para un sustituto de madera natural elaborado a base de plásticos reciclados*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2010. 95 p.
11. RAYMOND, E. Kirk; OTHMER, Donald F. *Enciclopedia de tecnología química*. Tom. 13. México: Unión Tipográfica Hispanoamericano 1963. 973 p.
12. SAMPIERI, Roberto; FERNÁNDEZ COLLADO, Carlos; BAPTISTA LUCIO, María del Pilar. *Metodología de la investigación*. 4ª ed. México: McGraw-Hill Interamericana, 2006. 139 p.
13. SOLDER, BURILLO, Manuel, *Mil Maderas II*. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia 2004. 578 p.

14. WALPOLE, Ronald E; MYERS, Raymond H; MYERS, Sharon L.
Probabilidad y estadística para ingenieros. 6^a ed. México: Prentice-Hall Hispanoamericana, 1999. 739 p.

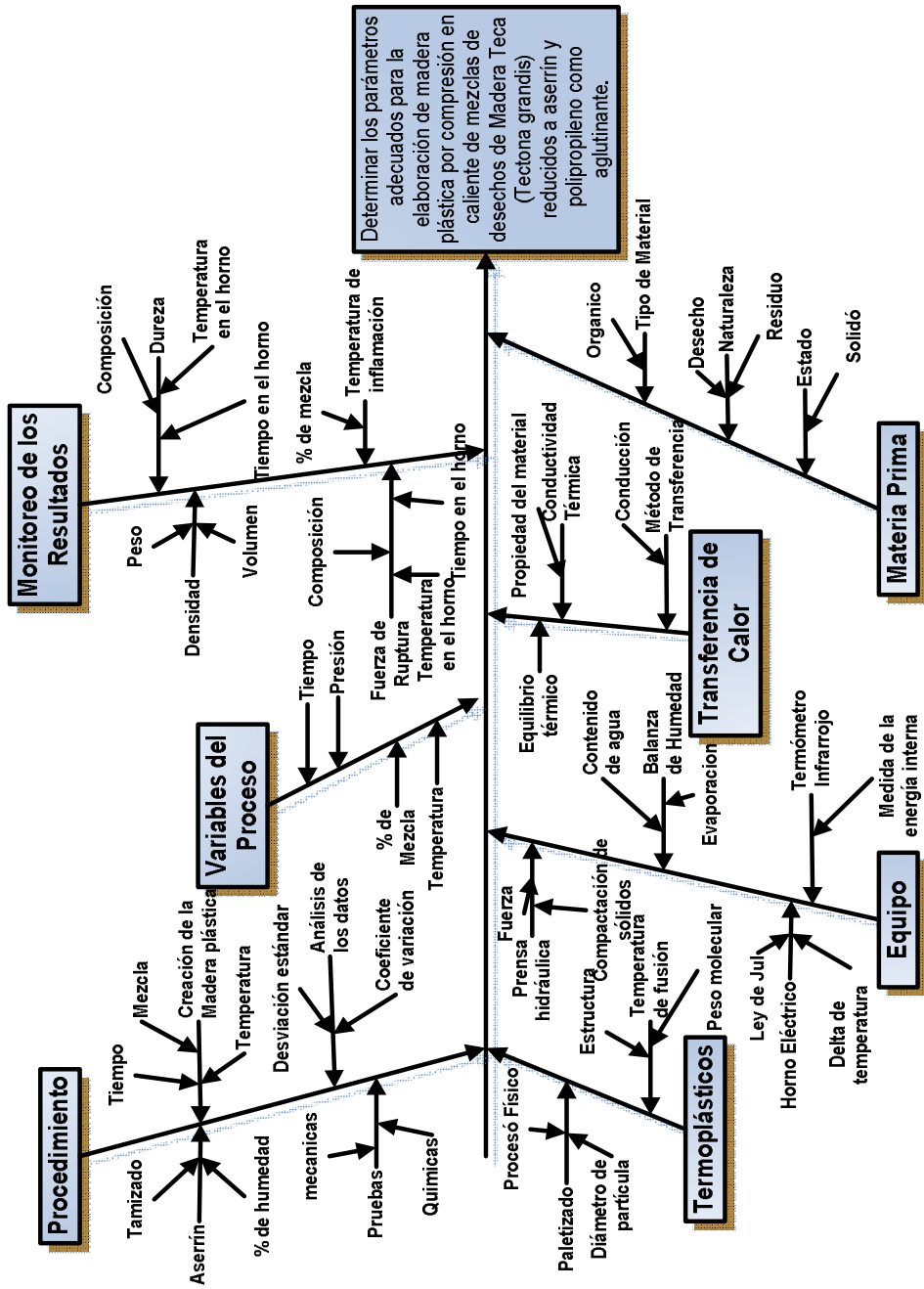
APÉNDICES

Figura 21. Requisitos académicos



Fuente: elaboración propia.

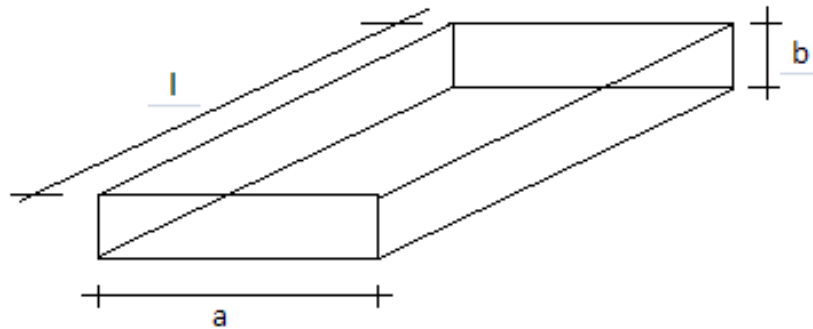
Figura 22. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

Tablas de recopilación y procesamiento de la información

Figura 23. Dimensiones de las probetas



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. Dimensiones de las piezas de madera plástica

Número de pieza de madera plástica	a	b	l	Número de pieza de madera plástica	a	b	l
10	38,15	7,895	98,63	21	37,62	7,37	121,25
11	36,67	6,470	116,13	22	37,11	7,33	119,20
12	36,70	7,465	94,37	23	36,95	6,22	114,83
13	38,36	7,700	114,73	24	37,75	6,26	116,87
14	38,52	6,895	115,32	25	37,74	6,32	111,84
15	38,88	8,420	121,74	26	42,99	8,35	100,58
16	37,62	6,670	89,64	27	38,06	8,91	115,53
17	37,68	8,655	115,89	37	39,10	8,08	97,83
18	35,97	6,195	112,53	38	37,70	5,67	99,15
19	37,09	5,100	112,93	39	38,31	5,67	112,63
20	36,56	7,445	115,27	40	36,62	5,90	111,03

Continuación de la tabla XXIV.

Número de pieza de madera plástica	a	b	l	Número de pieza de madera plástica	a	b	l
41	35,74	8,82	98	66	40,04	7,49	93,12
42	34,93	9,55	97,57	67	37,37	7,25	84,10
43	37,26	5,20	114,34	68	36,04	7,00	90,19
44	35,82	6,25	89,58	69	37,94	6,08	94,13
45	36,62	11,70	98,52	70	37,17	5,95	104,97
46	38,61	7,08	110,43	71	37,46	6,67	97,91
47	39,20	8,64	114,74	72	37,84	6,28	95,17
48	37,86	8,29	116,16	73	39,70	7,51	111,61
49	38,52	8,94	117,67	74	38,67	6,53	109,72
50	37,48	9,56	110,34	75	37,02	5,33	113,55
51	38,91	8,88	112,46	76	41,62	6,48	114,95
52	38,26	7,34	115,18	77	42,66	7,69	118,61
53	38,68	9,48	116,58	78	33,07	9,01	99,01
54	39,35	8,31	110,43	79	38,75	8,44	111,44
64	37,57	7,87	91,69	80	40,43	8,17	112,13
65	38,54	4,23	113,34	81	37,77	6,62	111,54

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Peso de las piezas de madera plástica y carga máxima de flexión**

Número de pieza de madera plástica	Peso en gramos	C_{max} de flexión (kg)	Número de pieza de madera plástica	Peso en gramos	C_{max} de flexión (kg)
10	19,78	22	46	25,15	22
11	21,58	30	47	30,86	32
12	20,00	12	48	33,22	56
13	21,46	33	49	28,15	18
14	28,06	34	50	25,96	20
15	28,91	26	51	31,57	35
16	15,60	26	52	22,78	16
17	22,87	18	53	28,23	22
18	22,41	32	54	30,78	32
19	19,47	18	64	17,70	8
20	25,62	32	65	15,76	10
21	29,44	40	66	18,86	16
22	26,65	40	67	15,88	18
23	21,54	22	68	16,45	16
24	24,80	20	69	16,74	14
25	21,07	28	70	17,74	14
26	27,05	28	71	18,18	12
27	30,55	52	72	16,48	14
37	21,45	22	73	22,44	10
38	14,53	6	74	20,30	10
39	22,71	32	75	16,80	10
40	18,58	22	76	25,39	20
41	17,50	12	77	33,18	32
42	23,00	52	78	22,26	32
43	19,36	22	79	22,03	13
44	14,87	18	80	24,72	25
45	25,81	22	81	21,38	11

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Piezas de madera plástica elaboradas con 40 % de aglutinante 60 % de aserrín pasado por el tamiz número 40 y retenido en el número 60**

	Tiempo en el horno (minutos)	Densidad (g/cm ³)	Temperatura de inflamación (°C)	Dureza escala Mohs	Módulo de ruptura (kg/cm ²)
Experimento E ₁₂	35	0,652883	280	4	43,83383
	45	0,851937	280	4	184,45551
	55	0,674805	285	4	90,68565
	35	0,696936	280	4	116,83785
	45	0,722877	285	4	115,50188
	55	0,770848	290	4	127,25548
	35	0,763406	285	3	135,40157
	45	0,743045	280	3	91,79394
	55	0,728599	280	3	119,59428

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Piezas de madera plástica elaboradas con 40 % de aglutinante 60 % de aserrín pasado por el tamiz número 40 y retenido en el número 60**

	Tiempo en el horno (minutos)	Densidad (g/cm ³)	Temperatura de inflamación (°C)	Dureza escala Mohs	Módulo de ruptura (kg/cm ²)
Experimento E ₁₃	35	0,673907	284	4	56,86718
	45	0,732599	284	4	77,31317
	55	0,749721	290	4	121,21621
	35	0,818887	290	4	145,89349
	45	0,852622	290	4	161,70957
	55	0,754328	290	3	151,78499
	35	0,604448	290	3	60,04777
	45	0,667339	290	3	118,09965
	55	0,766605	290	3	84,73052

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. **Piezas de madera plástica elaboradas con 50 % de aglutinante 50 % de aserrín pasado por el tamiz número 40 y retenido en el número 60**

	Tiempo en el horno (minutos)	Densidad (g/cm ³)	Temperatura de inflamación (°C)	Dureza escala Mohs	Módulo de ruptura (kg/cm ²)
Experimento E ₂₂	35	0,694012	300	5	109,88372
	45	0,684960	300	5	63,00693
	55	0,928256	290	5	331,26983
	35	0,773762	286	5	219,64202
	45	0,566406	300	5	55,02232
	55	0,706557	300	5	208,08752
	35	0,872941	290	4	277,83712
	45	0,740878	290	4	163,75798
	55	0,611186	283	4	55,90770

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **Piezas de madera plástica elaboradas con 50 % de aglutinante 50 % de aserrín pasado por el tamiz número 40 y retenido en el número 60**

	Tiempo en el horno (minutos)	Densidad (g/cm ³)	Temperatura de inflamación (°C)	Dureza escala Mohs	Módulo de ruptura (kg/cm ²)
Experimento E ₂₃	35	0,833031	282	5	144,91398
	45	0,794009	282	5	139,40913
	55	0,911067	280	5	274,37920
	35	0,694208	290	5	74,45251
	45	0,656276	283	5	74,36535
	55	0,812460	283	5	145,44241
	35	0,704172	290	4	98,95467
	45	0,660291	285	4	80,68143
	55	0,851764	290	4	149,94629

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **Piezas de madera plástica elaboradas con 60 % de aglutinante 40 % de aserrín pasado por el tamiz número 40 y retenido en el número 60**

	Tiempo en el horno (minutos)	Densidad (g/cm ³)	Temperatura de inflamación (°C)	Dureza escala Mohs	Módulo de ruptura (kg/cm ²)
Experimento E ₃₂	35	0,665841	311	6	117,95980
	45	0,783234	310	6	249,17930
	55	0,773570	310	6	74,81104
	35	0,633261	308	5	184,99674
	45	0,916141	306	5	236,71963
	55	0,725304	308	5	120,24783
	35	0,693550	310	4	198,06743
	45	0,605121	308	4	81,30881
	55	0,893575	306	4	295,51310

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **Piezas de madera plástica elaboradas con 60 % de aglutinante 40 % de aserrín pasado por el tamiz número 40 y retenido en el número 60**

	Tiempo en el horno (minutos)	Densidad (g/cm ³)	Temperatura de inflamación (°C)	Dureza escala Mohs	Módulo de ruptura (kg/cm ²)
Experimento E ₃₃	35	0,911443	310	6	237,89510
	45	0,816567	311	6	201,33745
	55	0,875612	310	6	249,55064
	35	0,821802	310	5	255,74830
	45	0,816068	310	5	196,19091
	55	0,897841	306	5	172,35228
	35	0,789232	308	4	236,45323
	45	0,748671	308	4	118,94805
	55	0,779338	307	4	219,18056

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. **Cálculo de la media aritmética**

	MEDIA ARITMÉTICA			
	Densidad (g/cm³)	Temperatura de inflamación (°C)	Dureza escala Mohs	Módulo de ruptura (kg/cm²)
Experimento E ₁₂	0,733926	282,77	3,666	113,928
Experimento E ₁₃	0,735606	288,66	3,555	108,629
Experimento E ₂₂	0,730995	293,22	4,666	164,935
Experimento E ₂₃	0,768586	285,00	4,666	131,393
Experimento E ₃₂	0,743289	308,55	5,000	173,200
Experimento E ₃₃	0,828508	308,88	5,000	209,739

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. **Cálculo del rango**

	RANGO			
	Densidad (g/cm³)	Temperatura de inflamación (°C)	Dureza escala Mohs	Módulo de ruptura (kg/cm²)
Experimento E ₁₂	0,199054	10	1	140,6216
Experimento E ₁₃	0,248174	6	1	104,8423
Experimento E ₂₂	0,361849	17	1	276,2475
Experimento E ₂₃	0,254790	10	1	200,0138
Experimento E ₃₂	0,311020	5	2	220,7020
Experimento E ₃₃	0,162771	5	2	136,8002

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIV. **Cálculo de la varianza**

	VARIANZA			
	Densidad (g/cm³)	Temperatura de inflamación (°C)	Dureza escala Mohs	Módulo de ruptura (kg/cm²)
Experimento E ₁₂	0,003478	13,194	0,250	1449,904
Experimento E ₁₃	0,007513	7,000	0,277	1613,500
Experimento E ₂₂	0,013314	46,444	0,250	10332,28
Experimento E ₂₃	0,008495	15,750	0,250	3919,002
Experimento E ₃₂	0,011871	3,277	0,750	6188,178
Experimento E ₃₃	0,003072	2,861	0,750	1899,035

Fuente: elaboración propia.

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

	DESVIACIÓN ESTÁNDAR			
	Densidad (g/cm³)	Temperatura de inflamación (°C)	Dureza escala Mohs	Módulo de ruptura (kg/cm²)
Experimento E ₁₂	0,058974	3,632415	0,5000	38,0776
Experimento E ₁₃	0,086681	2,645751	0,5270	40,1683
Experimento E ₂₂	0,115388	6,815016	0,5000	101,6478
Experimento E ₂₃	0,092172	3,968626	0,5000	62,6019
Experimento E ₃₂	0,108954	1,810463	0,8660	78,6649
Experimento E ₃₃	0,055430	1,691481	0,8660	43,5779

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVI. Comparación de los resultados

		Variables de operación			Variables a comparar			
	Mezcla	Temperatura (°C)	Presión Ton.	Tiempo en el horno minutos	Densidad (g/cm ³)	Temperatura de inflamación (°C)	Dureza escala Mohs	Módulo de ruptura (kg/cm ²)
1	60 % de aglutinante 40 % de aserrín	140	6	35	X	X	X	X
2		140	6	45	X	X	X	X
3		140	6	55	X	X	X	X
4		140	4	35	X	X	X	X
5		140	4	45	X	X	X	X
6		140	4	55	X	X	X	X
7		140	2	35	X	X	X	X
8		140	2	45	X	X	X	X
9		140	2	55	X	X	X	X
10		160	6	35	0,665841	311	6	117,9590
11		160	6	45	0,783234	310	6	249,1790
12		160	6	55	0,773570	310	6	74,8110
13		160	4	35	0,633261	308	5	184,9967
14		160	4	45	0,916141	306	5	236,7196
15		160	4	55	0,725304	308	5	120,2478
16		160	2	35	0,693550	310	4	198,0674
17		160	2	45	0,605121	308	4	81,3088
18		160	2	55	0,893575	306	4	295,5131
19		180	6	35	0,911443	310	6	237,8951
20		180	6	45	0,816567	311	6	201,3374
21		180	6	55	0,875612	310	6	249,5506
22		180	4	35	0,821802	310	5	255,7483
23		180	4	45	0,816068	310	5	196,1909
24		180	4	55	0,897841	306	5	172,3522
25		180	2	35	0,789232	308	4	236,4532
26		180	2	45	0,748671	308	4	118,9480
27		180	2	55	0,779338	307	4	219,1805

Continuación de la tabla XXXVI.

		Variables de operación			Variables a comparar			
	Mezcla	Temperatura (°C)	Presión Ton.	Tiempo en el horno minutos	Densidad (g/cm ³)	Temperatura de inflamación (°C)	Dureza escala Mohs	Módulo de ruptura (kg/cm ²)
28	50 % de aglutinante 50 % de aserrín	140	6	35	X	X	X	X
29		140	6	45	X	X	X	X
30		140	6	55	X	X	X	X
31		140	4	35	X	X	X	X
32		140	4	45	X	X	X	X
33		140	4	55	X	X	X	X
34		140	2	35	X	X	X	X
35		140	2	45	X	X	X	X
36		140	2	55	X	X	X	X
37		160	6	35	0,694012	300	5	109,8837
38		160	6	45	0,684960	300	5	63,0069
39		160	6	55	0,928256	290	5	331,2698
40		160	4	35	0,773762	286	5	219,6420
41		160	4	45	0,566406	300	5	55,0223
42		160	4	55	0,706557	300	5	208,0875
43		160	2	35	0,872941	290	4	277,8371
44		160	2	45	0,740878	290	4	163,7579
45		160	2	55	0,611186	283	4	55,9077
46		180	6	35	0,833031	282	5	144,9139
47		180	6	45	0,794009	282	5	139,4091
48		180	6	55	0,911067	280	5	274,3792
49		180	4	35	0,694208	290	5	74,4525
50		180	4	45	0,656276	283	5	74,3653
51		180	4	55	0,812460	283	5	145,4424
52		180	2	35	0,704172	290	4	98,9546
53		180	2	45	0,660291	285	4	80,6814
54		180	2	55	0,851764	290	4	149,9462

Continuación de la tabla XXXVI.

		Variables de operación			Variables a comparar			
	Mezcla	Temperatura (°C)	Presión Ton.	Tiempo en el horno minutos	Densidad (g/cm ³)	Temperatura de inflamación (°C)	Dureza escala Mohs	Módulo de ruptura (kg/cm ²)
55		140	6	35	X	X	X	X
56		140	6	45	X	X	X	X
57		140	6	55	X	X	X	X
58		140	4	35	X	X	X	X
59		140	4	45	X	X	X	X
60		140	4	55	X	X	X	X
61		140	2	35	X	X	X	X
62		140	2	45	X	X	X	X
63		140	2	55	X	X	X	X
64		160	6	35	0,652883	280	4	43,8338
65		160	6	45	0,851937	280	4	184,4555
66		160	6	55	0,674805	285	4	90,6856
67	40 % de aglutinante 60 % de aserrín	160	4	35	0,696936	280	4	116,8378
68		160	4	45	0,722877	285	4	115,5018
69		160	4	55	0,770848	290	4	127,2554
70		160	2	35	0,763406	285	3	135,4015
71		160	2	45	0,743045	280	3	91,7939
72		160	2	55	0,728599	280	3	119,5942
73		180	6	35	0,673907	284	4	56,8671
74		180	6	45	0,732599	284	4	77,3131
75		180	6	55	0,749721	290	4	121,2162
76		180	4	35	0,818887	290	4	145,8934
77		180	4	45	0,852622	290	4	161,7095
78		180	4	55	0,754328	290	3	151,7849
79		180	2	35	0,604448	290	3	60,0477
80		180	2	45	0,667339	290	3	118,0996
81		180	2	55	0,766605	290	3	84,7305

Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Figura 24. **Recolección del aserrín**



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

Figura 25. **Polipropileno**



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

Figura 26. **Tamizado del aserrín**



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

Figura 27. **Pesado de los materiales**



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

Figura 28. **Horneado de las piezas de madera plástica**



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

Figura 29. **Compresión de las piezas de madera plástica**



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

Figura 30. **Cortado de las piezas de madera plastic**



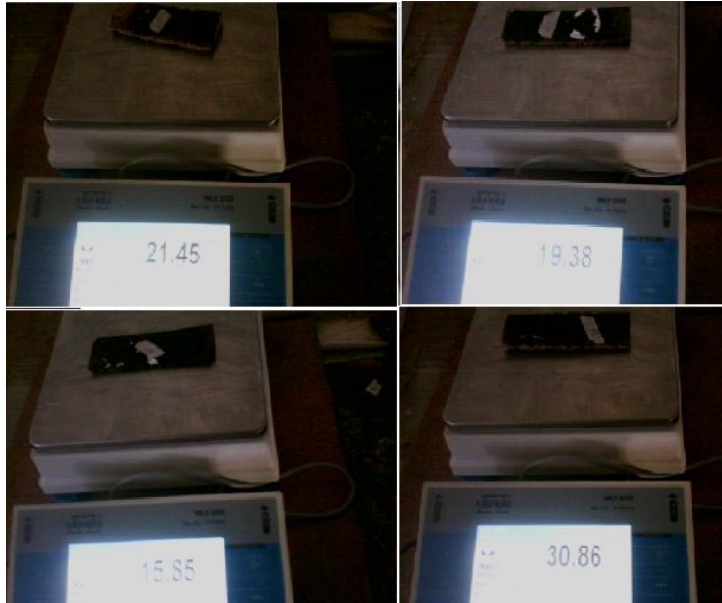
Fuente: Laboratorio Multipropósito de Sección de Tecnología de la Madera. CII. USAC.

Figura 31. **Medición de las piezas de madera plastica a ensayar**



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

Figura 32. **Pesado de las piezas de madera plástica**



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

Figura 33. **Prueba de flexión estática**



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

Figura 34. Prueba de la temperatura de inflamación



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