



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA FÍSICA

**CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS,
ESTRUCTURALES Y TÉRMICAS DE BIOCOMPUESTO PLÁSTICO A
BASE DE ALMIDÓN DE YUCA Y FIBRA DE CABUYA, PROCESADO
MEDIANTE MOLDEO POR COMPRESIÓN.**

Trabajo De Integración Curricular

Tipo: Proyecto Integrador

Presentado para optar al grado académico de:

FÍSICA

AUTORA:

EMILY SARAI ALTAMIRANO CONSTANTE

Riobamba- Ecuador

2022



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA FÍSICA

**CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS,
ESTRUCTURALES Y TÉRMICAS DE BIOCOMPUESTO PLÁSTICO A
BASE DE ALMIDÓN DE YUCA Y FIBRA DE CABUYA, PROCESADO
MEDIANTE MOLDEO POR COMPRESIÓN.**

Trabajo De Integración Curricular

Tipo: Proyecto Integrador

Presentado para optar al grado académico de:

FÍSICA

AUTORA: EMILY SARAI ALTAMIRANO CONSTANTE

DIRECTOR: DR. JOSÉ FÉLIX MEJÍA LÓPEZ

Riobamba- Ecuador

2022

©2022, Emily Sarai Altamirano Constante

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, EMILY SARAI ALTAMIRANO CONSTANTE, declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autora asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular; El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 28 de noviembre de 2022.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Emily Sarai Altamirano Constante', written in a cursive style.

Emily Sarai Altamirano Constante
0502863889

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA FÍSICA

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular, Tipo: Proyecto Integrador, **CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS, ESTRUCTURALES Y TÉRMICAS DE BIOCMPUESTO PLÁSTICO A BASE DE ALMIDÓN DE YUCA Y FIBRA DE CABUYA, PROCESADO MEDIANTE MOLDEO POR COMPRESIÓN**, realizado por la señorita **EMILY SARAI ALTAMIRANO CONSTANTE**, ha sido minuciosamente revisado por los miembros del tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los siguientes requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal autoriza su presentación.

FIRMA

FECHA

Biof. María Fernanda Heredia Moyano



2022/11/28

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Dr. José Félix Mejía López



2022/11/28

**DIRECTOR DEL TRABAJO DE
INTEGRACIÓN CURRICULAR**

Biof. Rosa Maricela Ormaza Hugo



2022/11/28

**ASESORA DEL TRABAJO DE
INTEGRACIÓN CURRICULAR**

DEDICATORIA

El presente Trabajo de integración curricular quiero dedicarlo primeramente a Dios que cuando he sentido una vida sin rumbo, o un vacío en mi ser, él me ha dado las mejores respuestas, es tan grande y suficiente que convierte un “no” en un “sí”. A mis padres Roberto Altamirano y Ana Constante quienes son mi inspiración para superar cualquier problema, me han enseñado valores y costumbres para ser una mujer capaz de dedicar la vida por los demás, por aquellos que son vulnerables, no tengo suficientes palabras para describir lo valiosos que son. A mi hermana Anita quien es mi complemento en esta vida, ella puede cambiar mis días tristes en alegres, sé que vendrán cosas hermosas para ella, porque ella es especial. A mi mejor amiga Naomy, en muy poco tiempo se ganó mi corazón y mi confianza, ella es el tipo de persona en quien puedes contar de forma incondicional porque tiene un corazón muy grande, espero reírme con ella hasta viejita. A mi amiga Diana Torres por haberme consolado en el momento más difícil de mi vida, por haber estado allí para mí y mi familia en todo tiempo. A toda mi familia, primos, tíos, y cuñado por preocuparse de mi vida de manera ilimitada. Me siento bendecida y agradecida por Dios porque he experimentado su infinito amor siempre, con cada persona que ha puesto en mi vida, espero poder llenarles de orgullo.

Emily

AGRADECIMIENTO

Agradezco primeramente a Dios porque me demuestra que cuando uno confía en él todo puede mejorar. A mis padres por apoyarme económica y psicológicamente en el proceso de este proyecto, mi más sincero agradecimiento a mi tutora de prácticas laborales la Biof. Gabriela Ureña por ayudarme de manera desinteresada, aportando conocimiento, habilidades y equipamiento para realizar los diferentes experimentos de este trabajo, también quiero agradecer a mi amiga Beverly Avilez por incentivarme a culminar mis estudios. Al Dr. José Mejía López por la entrega de conocimientos, sabiduría y paciencia, virtudes tales que permitieron que se culmine este Trabajo. A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por otorgarme las herramientas necesarias para que el sueño de ser profesional se cumpla, de igual manera quisiera agradecer a cada docente que formaron mi carácter y conocimiento, sobre todo al Profesor Francisco Carreras, que cada clase fue magistral llena de amor por la materia.

Emily

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	x
ÍNDICE DE ANEXOS	xii
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT	xiv
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

1	PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	3
1.1	Diagnóstico del problema	3
1.2	Antecedentes	3
1.3	Planteamiento del problema	4
1.4	Justificación (Técnica, científica y económica).....	5
1.5	Objetivos De La Investigación	6
1.5.1	<i>Objetivo General</i>	6
1.5.2	<i>Objetivos Específicos</i>	6
1.6	Hipótesis.....	6

CAPÍTULO II

2	MARCO TEÓRICO	7
2.1	Antecedentes de investigación.....	7
2.2	Referencias teóricas	9
2.2.1	<i>Polímero</i>	9
2.3	Referencias teóricas	11
2.3.1	<i>Polímero entrecruzado</i>	11
2.3.2	<i>Transiciones térmicas</i>	13
2.3.3	<i>Clasificación polímeros</i>	15
2.3.4	<i>Almidón como polímero termoplástico</i>	17
2.3.5	<i>Fibras naturales como refuerzo polimérico</i>	19
2.3.6	<i>Procesamiento de materiales por moldeo termo-compresión</i>	20
2.4	Bases Conceptuales	20
2.4.1	<i>Biocompuestos poliméricos</i>	20

2.5	Moldeo por compresión	20
2.5.1	<i>Caracterización de polímero termoplástico</i>	23

CAPÍTULO III

3	MARCO METODOLÓGICO.....	25
3.1	EXPERIMENTACIÓN	25
3.1.1	<i>Tratamiento de la fibra de cabuya</i>	25
3.2	Caracterización química del almidón de yuca	29
3.2.1	<i>pH</i>	29
3.2.2	<i>Humedad</i>	30
3.2.3	<i>Viscosidad</i>	31
3.3	Experimentación de plastificación de almidón de yuca.....	32
3.3.1	<i>TPS 1</i>	32
3.3.2	<i>TPS 2</i>	32
3.3.3	<i>TPS 3</i>	32
3.3.4	<i>TPS 4</i>	32
3.3.5	<i>TPS 5</i>	33
3.3.6	Experimentación Obtención del plástico termorígido	33
3.4	Implementación del sistema de alimentación de calor en Prensa Hidráulica	34
3.5	Moldeo por termo-compresión	38
3.5.1	<i>Muestra 1</i>	38
3.5.2	<i>Muestra 2</i>	39
3.5.3	<i>Muestra 3</i>	41
3.5.4	<i>Muestra 4</i>	42
3.5.5	<i>Muestra 5</i>	42

CAPÍTULO IV

4	MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	43
4.1	Caracterización mecánica (Ensayo Tensión por tracción).....	43
4.2	Caracterización morfológica	51
4.2.1	<i>Microscopio óptico</i>	51
4.2.2	<i>SEM Muestra 1</i>	54
4.2.3	<i>SEM Muestra 5</i>	56
4.3	Caracterización térmica	57
	CONCLUSIONES.....	61

RECOMENDACIONES.....	63
GLOSARIO	
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1:	Propiedades de tipos de materiales poliméricos de serie polietileno	10
Tabla 2.2 :	Comportamiento viscoelástico típico del polímero a temperatura ambiente.	14
Tabla 3.1:	Formulaciones de cada muestra.....	41
Tabla 4.1:	Resultados de pruebas mecánicas muestra 1.	44
Tabla 4.2:	Resultados de pruebas mecánicas muestra 2.	45
Tabla 4.3:	Resultados de pruebas mecánicas muestra 3.	46
Tabla 4.4 :	Resultados de pruebas mecánicas muestra 4.....	47
Tabla 4.5:	Resultados de pruebas mecánicas muestra 5.	48
Tabla 4.6:	Comparación de resultados de módulos de elasticidad.....	50
Tabla 4.7:	Apariencia degradación térmica.	58
Tabla 4.8:	Características de degradación térmica de cada muestra.....	59

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1.1:	Diagrama de producción mundial de plásticos.	4
Gráfico 2.1:	Macromoléculas de polietileno. Las esferas negras y blancas corresponden a los átomos de hidrógeno y carbono respectivamente.....	9
Gráfico 2.2 :	Ejemplos esquemáticos de la arquitectura de cadenas.....	11
Gráfico 2.3:	Hinchamiento de polímeros a base de micropartículas entrecruzadas.....	11
Gráfico 2.4:	Enredo de cadenas poliméricas. (a) Bajo peso molecular, sin enredos. (b) Alto peso molecular, las cadenas se enredan.	12
Gráfico2.5:	Efecto del peso molecular del polímero sobre la resistencia a la tracción.....	13
Gráfico2.6:	Comportamiento módulo-temperatura idealizado de un polímero amorfo. El eje vertical está en escala logarítmica.....	14
Gráfico 2.7:	Comportamiento tensión-deformación, la pendiente el módulo, el área bajo la curva proporciona la energía de fractura.....	15
Gráfico 2.8:	a) Termoplástico con estructura lineal sin entrecruzamiento, b) Elastómero con estructura entrecruzada semiabierta c) Termoestable con estructura entrecruzada cerrada.....	15
Gráfico 2.9:	Deformación elástica en un elastómero.....	17
Gráfico 2.10:	Proceso de gelatinización. Las moléculas de agua se unen a los gránulos de almidón mediante los puentes de hidrógeno que están libres.....	17
Gráfico 2.11:	Modelo automóvil con componentes a base de fibras naturales.....	20
Gráfico 3.1:	Medidas de masa experimentales para tratamiento de la fibra para una solución de 100ml.	26
Gráfico 3.2:	Mezcla agua destilada con ácido Oxálico.....	26
Gráfico 3.3:	Mezcla agua destilada con.....	27
Gráfico 3.4:	Solución de 100 ml en.....	27
Gráfico 3.5:	Reacción de la disolución con la fibra de cabuya, se puede ver el cambio de color de la disolución con el tiempo.....	28
Gráfico 3.6:	a) Lavado de las fibras b) residuos del tratamiento.....	28
Gráfico 3.7:	pH almidón sin marca.....	30
Gráfico 3.8:	pH almidón marca Karay.....	30
Gráfico 3.9:	Viscosidad Almidónmarca Karay.....	31
Gráfico 3.10:	(a) TPS (b) Emulsión TPS en agua.....	33
Gráfico 3.11:	Muestras de los TPS.....	34
Gráfico 3.12:	Prensa Hidráulica, del laboratorio de Soldadura de la Facultad de Mecánica...	35
Gráfico 3.13:	Placa de aluminio de 5cm de espesor, peso 60.75kg.....	35

Gráfico 3.14:	Placa 9mm con patas fijadoras que sostienen a la caja de calor.	36
Gráfico 3.15:	Molde para compuesto polimérico de grosor 3mm.	36
Gráfico 3.16:	Resistencia eléctrica de 25cm de ancho 40 cm de largo y con potencia de 1000W	36
Gráfico 3.17:	Bases fijadoras de la prensa hidráulica.	37
Gráfico 3.18:	Estructura base fijadora con placa de 9mm.	37
Gráfico 3.19:	Diseño montado de máquina de calor con base fijadora y molde para presión.	37
Gráfico 3.20:	Creación elastómero muestra 1.	39
Gráfico 3.21:	Proceso creación Elastómero Muestra 2.	40
Gráfico 3.22:	Disposición de fibras AB.	41
Gráfico 4.1:	Unidades de corte correspondientes en centímetros.	43
Gráfico 4.2:	Curvas esfuerzo-deformación, muestra 1.	45
Gráfico 4.3:	Curvas esfuerzo-deformación, muestra 2.	46
Gráfico 4.4:	Curvas esfuerzo-deformación, muestra 3.	47
Gráfico 4.5:	Curvas esfuerzo-deformación, muestra 4.	48
Gráfico 4.6:	Curvas esfuerzo-deformación, muestra 5.	49
Gráfico 4.7:	Comparación de curvas de cada muestra.	51
Gráfico 4.8:	Captura de imagen en microscopio óptico muestra 1.	52
Gráfico 4.9:	Captura de imagen en microscopio óptico muestra 2.	52
Gráfico 4.10:	Captura de imagen en microscopio óptico muestra 3.	53
Gráfico 4.11:	Captura de imagen en microscopio óptico muestra 4.	53
Gráfico 4.12:	Captura de imagen en microscopio óptico muestra 5.	54
Gráfico 4.13:	Superficie muestra 1 voltaje 20kV, resolución 200 μ m.	55
Gráfico 4.14:	Superficie de corte transversal muestra 1 voltaje 20kV, (a) resolución 50 μ m (b) resolución 200 μ m.	55
Gráfico 4.15:	Adherencia de fibras al polímero muestra 1.	56
Gráfico 4.16:	Superficie muestra 5 voltaje 20kV, (a) resolución 500 μ m, (b) resolución 200 μ m.	56
Gráfico 4.17:	Superficie de corte transversal de la muestra 5 con voltaje 20kV. (a) Resolución 500 μ m, (b) resolución 200 μ m y (c) resolución 100 μ m.	57

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** PROCESO DE ELABORACIÓN DE MÁQUINA DE CALOR.
- ANEXO B:** MONTAJE DE MÁQUINA DE CALOR EN PRENSA HIDRÁULICA.
- ANEXO C:** PROCESO DE TRATAMIENTO DE FIBRAS.
- ANEXO D:** RESIDUOS DE FIBRAS LAVADAS
- ANEXO E:** UTILIZACIÓN DE LA MÁQUINA SEM.
- ANEXO F:** MUESTRAS CORTADAS EN MÁQUINA DE CORTE LASER.
- ANEXO G:** PRESUPUESTO ECONÓMICO.

RESUMEN

En el presente trabajo se tuvo por objetivo caracterizar las propiedades mecánicas, estructurales y térmicas de polímeros de almidón de yuca reforzados con fibra de cabuya, procesados mediante moldeo por termocompresión. Se realizó un tratamiento superficial de las fibras en una solución de 0.1% de $KMnO_4$ y 5% de ácido oxálico $C_2H_2O_4$. La máquina de calor fue desarrollada a partir de una resistencia, una termocupla y una placa de acero, con dimensiones de $50 \times 50 \times 9 \text{ mm}^3$. Se moldeó 5 diferentes muestras de compuesto polimérico, a una temperatura de $145^\circ C$ durante 40min, variando su presión, TPS, cantidad de agua y disposición de fibras, todo esto con el objetivo de investigar las variables que resultan de mayor eficiencia. La muestra 1 es químicamente diferente al resto, debido a su formulación con diferentes porcentajes de almidón, glicerina y agua. Las muestras 2 y 5 tienen disposición de fibras tipo sándwich ABC, mientras las muestras 1, 3 y 4 tipo AB. Se obtuvo que, la cantidad de concentración química interviene en el comportamiento morfológico, mecánico y térmico, por lo tanto, la muestra 1 tuvo el menor módulo de elasticidad, sin poros en su superficie, demostrando tener más resistencia al calor. Las muestras 2 y 5 tuvieron la mejor adherencia fibra matriz debido a su disposición de fibra. Con las variaciones realizadas de presión en las muestras 3, 4 y 5, se puede decir que a mayor presión mayor módulo de elasticidad. En conclusión, se caracterizó mecánica, estructural y térmicamente cada muestra, encontrando que la muestra 5 fue la más eficiente; su módulo de elasticidad oscila entre 494 y 539MPa, tiene alta porosidad, y temperatura de degradación térmica desde 200 a $585^\circ C$. Todas las muestras demostraron ser rugosas superficialmente con baja adherencia polímero-fibra, para mejorar esto, se debe cortar las fibras mucho más pequeñas y mezclarlas junto con el polímero a velocidad constante.

Palabras clave: <CIENCIA DE MATERIALES>, <CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES>, <MOLDEO POR COMPRESIÓN>, <ADHERENCIA POLÍMERO-FIBRAS>, <TERMOPLÁSTICO DE ALMIDÓN DE YUCA>.



0040-DBRA-UPT-2023

ABSTRACT

The aim of the present work was to characterise the mechanical, structural, and thermal properties of cassava starch polymers reinforced with cabuya fibre, processed by thermocompression moulding. The fibres were surface treated in a solution of 0.1% $KMnO_4$ and 5% oxalic acid $C_2H_2O_4$. The heat engine was developed from a resistor, a thermocouple, and a steel plate, with dimensions of $50 \times 50 \times 9 \text{ mm}^3$. Five different samples of polymer composite were moulded at a temperature of $145^\circ C$ for 40min, varying their pressure, TPS, amount of water and arrangement of fibres, all with the aim of investigating the variables that result in higher efficiency. Sample 1 is chemically different from the rest, due to its formulation with different percentages of starch, glycerine, and water. Samples 2 and 5 have an ABC sandwich fibre arrangement, while samples 1, 3 and 4 have an AB arrangement. It was obtained that, the amount of chemical concentration intervenes in the morphological, mechanical, and thermal behaviour, therefore, sample 1 had the lowest modulus of elasticity, with no pores on its surface, proving to have more resistance to heat. Samples 2 and 5 had the best fibre- matrix adhesion due to their fibre arrangement. With the pressure variations in samples 3, 4 and 5, it can be said that the higher the pressure, the higher the modulus of elasticity. In conclusion, each sample was mechanically, structurally, and thermally characterised, finding that sample 5 was the most efficient; its modulus of elasticity ranges from 494 to 539MPa, it has high porosity, and thermal degradation temperature from 200 a $585^\circ C$. All samples proved to be superficially rough with low polymer-fibre adhesion, to improve this, the fibres should be cut much smaller and mixed with the polymer at constant speed.

Keywords: <MATERIALS SCIENCE>, <MATERIALS CHARACTERISATION>, <COMPRESSION MOULDING>, <POLYMER-FIBRE ADHERENCE>, <YUCA ALMIDON TERMOPLASTIC>.



Dra. Carmita Eulalia Rojas Castro. Mgs.

0602890469

INTRODUCCIÓN

En empresas de todo el mundo se utiliza polímeros sintéticos, normalmente desarrollados a partir de petróleo, que causan un devastador impacto ambiental. Existen varias investigaciones que se centran en buscar materiales biodegradables que ayuden al medio ambiente. (Rahul, 2019; Brenes, 2014; Saravanan, 2013; Rua, 2019; Srimivasa, 2011; Temesgen, 2020; Gonzales, 2014; Torres, 2007; Luna, 2009; Mina, 2012; Ayala, 2015; Girones, 2012).

En la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo se han desarrollado este tipo de materiales con el método de extrusión, el cual es difícil y conlleva mucho tiempo de procesamiento. La importancia de desarrollar este proyecto es que utilizamos un nuevo método dentro de las instalaciones de la ESPOCH, conocido como el método de moldeo por termocompresión para plásticos rígidos de entre 3 a 5mm de espesor. Estos materiales son bastante interesantes por sus características mecánicas.

Esta investigación desarrolla y caracteriza un biocompuesto plástico a base de almidón de yuca y fibra de cabuya, con propiedades rígidas obtenidas bajo un proceso de moldeo por termocompresión.

Realizar esta investigación fue relativamente complicada ya que se necesitó bastante presupuesto y tiempo para caracterizar las propiedades de los materiales.

Para desarrollar este proyecto, primero se realizó una investigación sobre la teoría necesaria para comprender los aspectos metodológicos a utilizar (capítulo II). El capítulo III trata sobre la metodología utilizada; primero se trató químicamente la fibra de cabuya en una solución de 5% p/v de ácido oxálico y 0.1% p/v permanganato de potasio, y luego se realizó una investigación para obtener gránulos termoplásticos (TPS) de almidón con plastificantes (glicerina y agua), y así poder conocer las condiciones y porcentajes en que los gránulos tienen mejor calidad de procesamiento. Además, se construyó una máquina de calor que fue integrada a la máquina hidráulica ubicada en el laboratorio de soldadura de la Facultad de Mecánica en la ESPOCH. El modelo de la máquina fue primero desarrollado en AutoCad. La matriz y la fibra de refuerzo del biocompuesto se procesó en el laboratorio de electromagnetismo de la Facultad de Ciencias. El moldeo y mezcla de las componentes se realizaron en el laboratorio de soldadura de la Facultad de Mecánica, obteniendo 5 muestras con variaciones en parámetros tanto termodinámicos como químicos, y con su respectivo proceso de moldeo: mezcla TPS-agua con relaciones 1:1 o 1:2, mezcla de fibras con el TPS en diferentes ordenes de colocación (disposición) y presiones de 3 o 4MPa en un tiempo de 40 minutos. Además, para cada muestra se utilizó una temperatura

evaporación de agua de $100^{\circ}C$ durante 30 min, una temperatura de moldeo de $145^{\circ}C$ y un secado a una temperatura de $50^{\circ}C$ por un tiempo de 4 horas.

En el capítulo IV se analiza las propiedades de las muestras; la caracterización mecánica se hizo según el método ASTM D638-14 (Tracción de plásticos rígidos), se cortaron las probetas con máquina de corte con rayo láser, los ensayos de tracción se realizaron en la máquina universal ubicada en el laboratorio de investigación de la Facultad de Ciencias. Los ajustes de las curvas stress-strain se realizó en el programa Gnuplot. Para la caracterización morfológica de todas las muestras se utilizó el microscopio óptico en el laboratorio de óptica y fotónica de la Facultad de Ciencias. También se utilizó la máquina de microscopía electrónica de barrido del laboratorio de materiales de la Facultad de Mecánica para caracterizar 2 muestras. Para la caracterización térmica se utilizó una mufla del laboratorio de investigación. Cualitativamente se demostró la degradación térmica de las muestras cuando son sometidas a temperaturas desde 200 a $700^{\circ}C$.

CAPÍTULO I

1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Diagnóstico del problema

Con esta investigación se espera estudiar las propiedades mecánicas, estructurales y térmicas de un nuevo compuesto completamente biodegradable, utilizando almidón de yuca y fibra de cabuya. Para poder lograr esto, es necesario hacer un estudio de los efectos que tienen las variables externas (temperatura, tiempo y presión) cuando procesamos nuestro compuesto mediante moldeo por termo-presión, también es necesario analizar parámetros como la cantidad de fibra de cabuya, cantidad de plastificante en la matriz polimérica, y otra variable importante es el porcentaje de permanganato de potasio y ácido oxálico para tratar superficialmente a las fibras. Realizaremos varias muestras y por cada muestra se deben realizar probetas de ensayo para poder caracterizarlas y con estos resultados estudiar qué medidas de las variables termodinámicas van a ser más eficientes al momento de producir el material. La meta del proyecto es presentar a la comunidad una alternativa sustentable con el medio ambiente, un compuesto termoplástico totalmente biodegradable con buenas características mecánicas, estructurales y térmicas.

1.2 Antecedentes

La fabricación de materiales compuestos a base de polímeros sintéticos utilizado para mejorar las propiedades mecánicas de cualquier producto se ha vuelto indispensables para las empresas en todo el mundo. Día a día podemos ver la creación de nuevos productos tecnológicos con múltiples posibilidades de uso, sin embargo, esto genera de forma exponencial un devastador impacto ambiental para nuestro planeta, debido a que la mayoría de estos polímeros sintéticos se obtienen del petróleo (polietileno y polipropileno). Este tiene alta resistencia a la corrosión, al agua y a la descomposición, provocando que sus residuos tarden hasta 500 años en degradarse (Valero, 2013, p.9). El Gráfico 1.1 muestra el aumento en la producción mundial de plástico que en 1950 fue de 2,3 millones de toneladas, pasó a 407 millones de toneladas en 2015 (Libera, 2015, p.5), y en 2016 se registró 2010 millones de toneladas (Kasa, 2010, p.8).

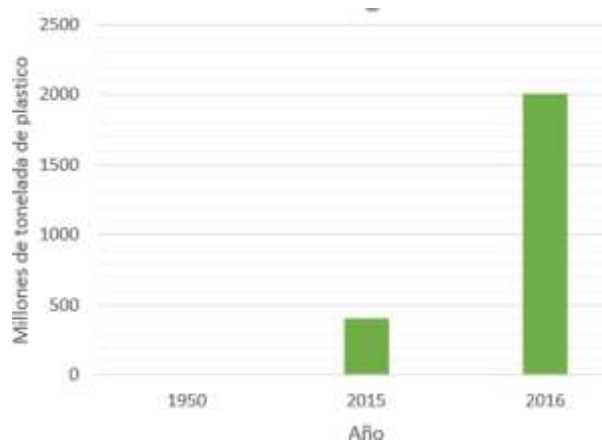


Gráfico 1.1: Diagrama de producción mundial de plásticos.

Elaborado por: Altamirano, 2022.

1.3 Planteamiento del problema

El objetivo de esta tesis es estudiar las propiedades mecánicas, estructurales y térmicas de un compuesto polimérico a base de almidón y fibra de cabuya, totalmente biodegradable; esto aportará con nuevos conocimientos sobre las propiedades de este tipo de compuestos amigables con el medio ambiente. Además, podremos ayudar a generar conciencia en el uso de nuevos materiales biodegradables que puedan disminuir el impacto ambiental que sufrimos.

En investigaciones pasadas (Rahul, 2019; Brenes, 2014; Saravanan, 2013; Rua, 2019; Srimivasa, 2011; Temesgen, 2020), realizadas en varios países del mundo, utilizaron resina epóxica o polietileno como la base de la matriz de los compuestos, y utilizan la fibra de cabuya como la fase ecológica de sus compuestos obteniendo resultados excepcionales, pues al analizar las propiedades del compuesto con la fibra natural se observa que es mecánicamente más eficiente que el compuesto con fibra sintética. Sin embargo, para ser un compuesto biodegradable sus dos fases deben ser amigables con el medio ambiente; claramente la fase polimérica que utiliza resina epóxica o polietileno es perjudicial para el medio ambiente, por eso en esta investigación queremos que las dos fases tanto el polímero como la fibra sean biodegradables. Esta investigación experimental es parte de la rama de ciencia de los materiales; la base de esta ciencia es relacionar las propiedades de un material con el rendimiento aplicativo del mismo, estudiando y caracterizando sus propiedades físicas.

El material que desarrollamos es un biocompuesto polimérico termoplástico. En este trabajo se caracterizó físicamente nuestro material estudiando la relación que existe entre las variables termodinámicas (temperatura, presión y tiempo) y las propiedades mecánicas y estructurales del biocompuesto. Para poder cumplir con nuestro objetivo es necesario generar varias muestras

diferentes de nuestro material, ya que para cada una diferirá la medida de las variables termodinámicas con que son sometidas al moldeo por termo-presión.

1.4 Justificación (Técnica, científica y económica)

En investigaciones pasadas se investigó el uso exitoso de fibras naturales de cabuya como una alternativa sustentable al medio ambiente para ser usadas en matrices poliméricas, ya que tienen características superiores a las fibras sintéticas: son abundantes en América latina, menos costosas, son renovables, poseen menor densidad y son biodegradables (Khan et al., 2013; Mina et al., 2014).

Es necesario realizar este tipo de investigaciones porque de esta manera ayudamos al estudio que se realiza mundialmente sobre polímeros amigables con el medio ambiente.

En esta investigación se fabricará un polímero termoplástico biodegradable con distribución y matriz de almidón reforzado con la fibra de cabuya mediante moldeo por termo-presión. Realizaremos un análisis estadístico de las propiedades físicas que posee el biocompuesto, esto debido a que son varias muestras que deben ser estudiadas, ya que se variará ciertos parámetros termodinámicos durante el desarrollo del material tales como la temperatura o la presión, todo esto para conocer cuándo nuestro biocompuesto va a tener eficiencia máxima.

Antes de mezclar ambas componentes es necesario hacer un tratamiento a la fibra (fase1) con ácido oxálico y permanganato de potasio para que tenga menos impurezas, mejor adherencia a la matriz, y sea más elástica; también se debe plastificar el almidón (fase2) con agua y glicerina (Rua, 2019, p.14). Una vez realizada ambas fases, debemos procesar a nuestro material mezclando ambas fases. Para ello usaremos el método de moldeo por termocompresión, en una máquina hidráulica; este es el método de proceso más utilizado ya que elimina los grumos de aire en las muestras y reduce costos de producción. Se estudiarán los efectos de parámetros como la presión, temperatura o el tiempo de moldeo, para obtener mejores propiedades de nuestro material. Se podría hacer el trabajo sin eliminar las impurezas de las fibras, así el proceso de fabricación sería más simple y económico, sin embargo, queremos que el compuesto cumpla con la mayor eficiencia mecánica posible. En este trabajo se quiere investigar si las características físicas de un compuesto ecológico son eficientes.

1.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1 Objetivo General

- Caracterizar las propiedades mecánicas, estructurales y térmicas de un biocompuesto plástico a base de almidón de yuca y fibra de cabuya, procesado mediante moldeo por compresión.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Realizar un tratamiento superficial de la fibra de cabuya para mejorar su adherencia a la matriz polimérica.
- Construir un compuesto de matriz polimérica a través de moldeo por compresión, variando ciertos parámetros termodinámicos durante este proceso.
- Realizar pruebas de tensión por tracción, análisis de superficie del polímero con un microscopio, y análisis cualitativo térmico.
- Estudiar los resultados obtenidos de las pruebas de caracterización.

1.6 Hipótesis

¿Las propiedades mecánicas, estructurales y térmicas de un biocompuesto plástico, totalmente biodegradable a base de almidón de yuca, fibra de cabuya y procesado mediante moldeo por compresión, son diferentes dependiendo de los parámetros involucrados en el desarrollo del compuesto (tales como cantidad de plastificante, presión, orden de colocación de las fibras)?

CAPÍTULO II

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de investigación

Por mucho tiempo se ha venido investigando el uso de fibras naturales como sustituto de las fibras sintéticas en materiales compuestos, ya sean termoestables o termoplásticos. En una investigación (Brenes, 2014, p.20) se comparó las propiedades mecánicas de la resina de poliéster con y sin refuerzo con fibras de vidrio y cabuya, y se estudió la tracción, la resistencia y el módulo de Young del sistema, resultando que un aumento en la carga de fibra disminuye la resistencia a la tracción y aumenta la Módulo de Young; las propiedades mecánicas de resistencia a la tracción y a la flexión obtenidas para el compuesto reforzado con cabuya fueron superiores a los obtenidos para la fibra de vidrio.

Existen otras investigaciones similares que aportan gran información, varias de ellas utilizan las fibras naturales como refuerzos de resinas sintéticas. En el estudio de Saravanan et al. (2013, pp.1-23) se realizó un compuesto a base de polipropileno reforzado con fibra de yute mediante moldeo por compresión; ellos estudiaron el efecto de la temperatura, la presión y el tiempo de tratamiento sobre la propiedad de resistencia al impacto del compuesto. Las mejores propiedades de resistencia al impacto se observan si el tablero compuesto se fabrica utilizando baja temperatura (165°C), una presión de 8,13 bar y un tiempo de tratamiento de 3 min.

También Rua et al. (2019, pp.2-15) mencionan que la resina epoxi reforzada con las fibras de Fique (cabuya) tiene un buen comportamiento dinámico: las muestras de su experimento fueron analizadas mediante microscopía electrónica de barrido para ver su forma microestructural, y se realizaron pruebas de impacto evaluadas por charpy y split-hopkinson (SHPB). Srinivasa (2011, p.5) fabricó varias muestras, unas con fibras naturales de areca sin tratar, y otras tratadas en un medio ácido; estas muestras se las caracterizó por pruebas físicas de flexión e impacto y resultó que, en comparación con la fibra no tratada, la fibra de areca que fue tratada con álcali tuvo un cambio significativo en la resistencia a la flexión y al impacto. Por otro lado, Temesgen (2020, pp.6-15) elaboró un compuesto mediante moldeo por compresión, e investigó el comportamiento de los parámetros del proceso como la temperatura de calentamiento (T), la presión de compresión (P) y el tiempo de moldeo (t), demostrando que la mayor resistencia a la tracción se registra a la temperatura de calentamiento de 175 °C y compresión de 1 MPa y la resistencia a la tracción más baja a una temperatura de calentamiento de 185 °C y una presión de 1,5 MPa.

Para poder llamar a un compuesto totalmente biodegradable es necesario que sus dos fases poliméricas sean degradables, y para ello las resinas no deben ser sintéticas sino naturales. Para ello existen varias opciones, sin embargo, la más utilizada por los investigadores es la resina a base de almidón. Según, Torres et al., (2007, p.1-17), el biocompuesto a base de almidón y fibra natural es totalmente biodegradable. En esa investigación se analizaron varios almidones (papa, batata y almidón de maíz) y tres tipos de fibras naturales (sisal, yute y cabuya); se utilizaron diferentes plastificantes (agua y glicerol) para los polímeros de almidón. Los mejores resultados para la resistencia al impacto se obtuvieron para las fibras de yute y de cabuya.

En la investigación bibliográfica realizada por Rahul et al., (2019, p.6), se resume que en estos días se puede crear materiales termoplásticos a base de almidón como sustituto de la resina sintética; este material es preferido por muchos investigadores debido a su disponibilidad en abundancia y bajo costo. Para generar termoplásticos se debe moldear por compresión, termo-prensado, etc., donde generalmente se aplica una temperatura de 140–160°C, y una presión de 3 y 5 MPa. La temperatura de descomposición del almidón puro es de 220°C y la adición de plastificante puede reducir esta temperatura, por lo tanto, la temperatura de procesamiento del almidón plastificado con glicerol no debe ser demasiada alta porque, aunque la temperatura de ebullición y descomposición del glicerol es de aproximadamente 290°C, se ha comprobado que la temperatura para mezclar almidón con glicerol no puede ser más de 170°C.

Actualmente no existen muchas investigaciones sobre compuestos a base de almidón y fibras naturales, y resulta interesante que en varios estudios elaboraron sus compuestos con almidón de yuca. Por ejemplo, Luna (2012, p.8) utilizó almidón de yuca y lo reforzó con fibra de fique, empleó fibras cortas de fique al 10, 15 y 20%, y al analizar sus propiedades mecánicas resultó que el esfuerzo fue mayor para el compuesto con 10% de fibra, mientras que con 15 y 20% disminuyó. Así mismo Mina (2012, p.8) realizó una caracterización del almidón termoplástico (TPS) de yuca y fibras de fique, para poder estimar la factibilidad de realizar este tipo de experimentos. Otro tipo de almidón que es bastante utilizado es el de maíz (Girones, 2012, pp.2-21) con el que se obtiene un material termoplástico, a partir de almidón de maíz no modificado industrial, mediante un procesado por fusión (un proceso donde se puede analizar la temperatura de transición vítrea). Para determinar las propiedades del compuesto se realizaron pruebas de rigidez. Un dato interesante es que la adición de un plastificante de látex natural al compuesto disminuyó la cinética de absorción de agua sin afectar las propiedades térmicas y mecánicas del material.

2.2 Referencias teóricas

2.2.1 Polímero

"Polímero" viene del griego πολυ (polu) para "muchos" y με-ρος (meros) por "parte", que significa cadena larga que consta de muchas partes. Los polímeros son macromoléculas que están construidas por miles de elementos orgánicos llamados monómeros, los cuales están unidos por enlaces covalentes, y que están compuestos por átomos de carbono. Para polimerizar a los monómeros se deben usar reactivos para producir largas cadenas. Un ejemplo de esto es el polietileno (polímero), formado por etileno (monómero); cada etileno está compuesto por dos átomos de carbono y cuatro átomos de hidrógeno (Hermida, 2011, p.20), como se muestra en el Gráfico 2.1.

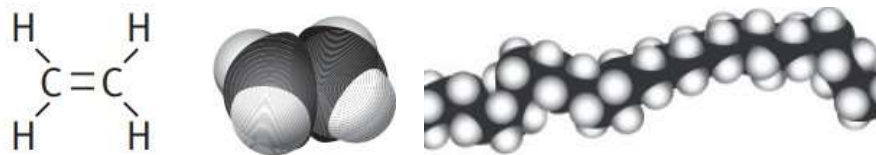


Gráfico 2.1: Macromoléculas de polietileno. Las esferas negras y blancas corresponden a los átomos de hidrógeno y carbono respectivamente.

Fuente: Hermida 2012, p.14.

El peso molecular mínimo necesario para que una sustancia se denomine polímero y que tenga buenas propiedades físicas se sitúa aproximadamente en 25 g/mol. Las características de los polímeros son representadas por el comportamiento de las moléculas más pequeñas; cuando aumenta el peso de la serie molecular, aumenta la viscosidad del polímero. En el caso del polietileno, a medida que aumentan los átomos de carbono en la serie, más peso molecular tienen y las propiedades pasarán de ser un gas a un sólido (Sperling, 2005, p.4). La Tabla 2.1 muestra diferentes tipos de materiales poliméricos de la serie polietileno, el cual da un mejor entendimiento de esta relación.

La gran variedad de las propiedades de los polímeros se debe a que las moléculas de polímero constan de muchas partes con propiedades individuales, a las variaciones en la secuencia de unidades repetidas y a la longitud de la cadena. Generalmente estas cadenas de polímeros se doblan formando figuras al azar, y la arquitectura de la cadena del polímero se puede ver fácilmente preguntando si el ensamblaje de la cadena es lineal, ramificada o entrecruzada. (Hermida, 2011, p.15); las características de cada una de estas arquitecturas son las siguientes:

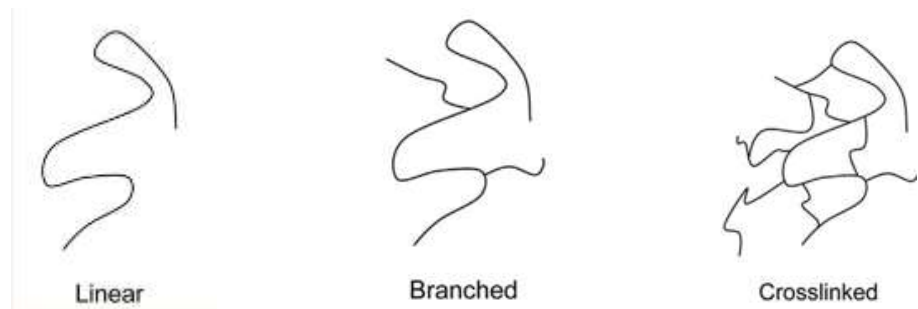
- La arquitectura lineal siempre tiene la misma unión.
- La ramificada tiene cadenas unidas a la estructura lineal principal.
- En la entrecruzada se forman enlaces entre las cadenas lineales y ramificada

Tabla 2.1: Propiedades de tipos de materiales poliméricos de serie polietileno

Numero de carbonos en la cadena	Estado y propiedades del material	Aplicaciones
1-4	Gases simples	Gas envasado para cocinar
5-11	Líquido sencillo	Gasolina
9-16	Líquido de viscosidad media	Queroseno
16-25	Líquido de alta viscosidad	Aceite y grasa
25-50	Sólido cristalino	Velas de cera de parafina
50-1000	Sólido semicristalino	revestimientos para cartones
1000-5000	Sólido plástico resistente	botellas y envases de polietileno
3-6x10 ⁵	Fibras	Chalecos antibalas

Fuente: Brady, 2017, p.4.

En el Gráfico 2.2 se muestra ejemplos de las diferentes arquitecturas que pueden adoptar los polímeros.



a) cadena lineal b) cadena ramificada c) cadena entrecruzada

Gráfico 2.2: Ejemplos esquemáticos de la arquitectura de cadenas.

Fuente: Brady et al. 2017, p.3.

Si uno toma una cadena lineal y la estira, se obtiene una línea simple. Si tomamos una estructura ramificada y la sometemos a deformación, en el caso más simple, se obtiene un objeto bidimensional. De la misma manera el entrecruzamiento producirá un elemento de volumen tridimensional bajo cualquier deformación aplicada (Brady, 2017, p.23).

2.3 Referencias teóricas

2.3.1 Polímero entrecruzado

Un polímero entrecruzado puede ser, un sólido muy duro que no se hincha (segmentos cortos), o muy hinchable (segmentos muy flexibles y compatibles con solventes) bajo las condiciones apropiadas del solvente. Un ejemplo de esto es el almidón cuando se lo une con un solvente, se calienta esta mezcla y luego se lo deja enfriar; el polímero pasa de tener características viscosas a ser más elástico y esto se debe a que los enlaces covalentes permanentes dominan las situaciones (Brady, 2017, pp.1-5).

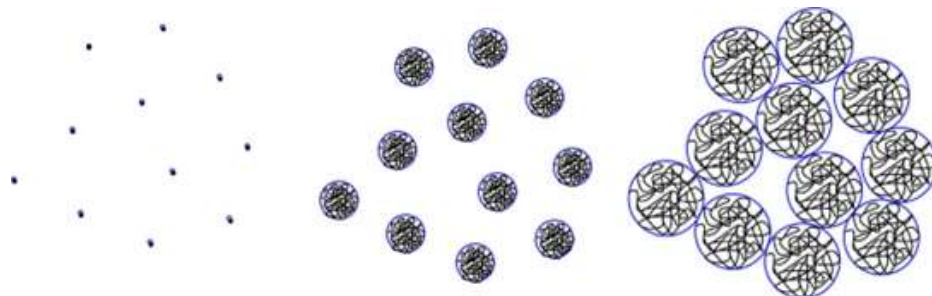


Gráfico 2.3: Hinchamiento de polímeros a base de micropartículas entrecruzadas

Fuente: Brady et al. 2017, p.4.

En el Gráfico 2.3 se observa que a medida que las partículas se hinchan ocupan una fracción de volumen cada vez mayor, de tal manera que inicialmente se encuentran dispersos y luego llegan

al punto en que las partículas comienzan a tocarse alcanzando así su límite de hinchamiento.

En la ciencia física de los polímeros, se describe la relación entre la estructura, como la morfología y el comportamiento físico y mecánico de los polímeros; estos dependen de la forma en que se cristalizó el sistema para obtener la forma, el tamaño y organización. El comportamiento mecánico incluye los módulos de relajación, tensión, alargamiento y hasta la rotura; estos se relacionan con la estructura molecular y el proceso por el cual ha pasado el polímero (Sperling, 2005, p.23).

2.3.2 Resistencia a la tracción

La resistencia a la tracción se define como la tensión de rotura durante el alargamiento y se mide en unidades de Pascales. Esta resistencia depende del peso molecular del polímero, el cual a su vez depende de la cantidad de entrelazamiento, como se ejemplifica en el Gráfico 2.4 (Sperling, 2005, p.24).

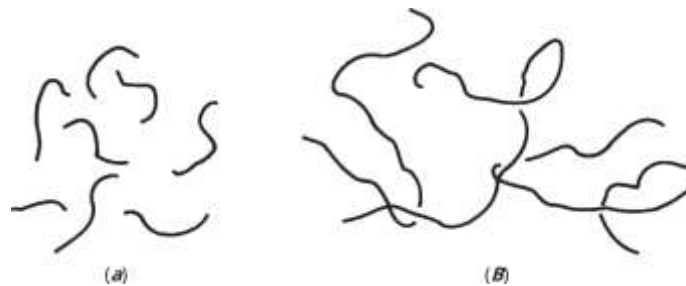


Gráfico 2.4: Enredo de cadenas poliméricas. (a) Bajo peso molecular, sin enredos. (b) Alto peso molecular, las cadenas se enredan.

Fuente: Sperling 2005, p.6.

En el Gráfico 2.5 se muestra el efecto del peso molecular sobre la resistencia a la tracción a los polímeros σ_b . A pesos moleculares muy bajos, la tensión de tracción es cercano a cero y a medida que aumenta el peso molecular, la resistencia a la tracción aumenta rápidamente y luego se nivela poco a poco (Sperling, 2005, p.24).

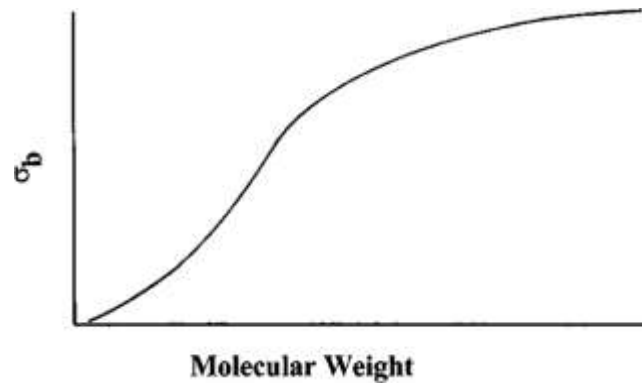


Gráfico 2.5: Efecto del peso molecular del polímero sobre la resistencia a la tracción.

Fuente: Sperling 2005, p.6.

2.3.3 Transiciones térmicas

Los materiales poliméricos pueden tener dos tipos de transiciones térmicas: la temperatura de fusión cristalina que es la región en que domina la cristalinidad, y la temperatura de transición vítrea en donde su fase amorfa hace que; su comportamiento sea rígido, es decir el material comienza a ser frágil a rotura. En el Gráfico. 2.6 se muestra el módulo de Young (que es una medida de la rigidez) como función de la temperatura; se observa que a bajas temperaturas el polímero es duro ya que tiene un alto valor del módulo de Young, y a esta región (región 1) se le conoce como zona vítrea. Esta zona está asociada a una baja movilidad molecular debido a la insuficiente energía térmica para activar los movimientos atómicos. En la zona de transición vítrea (región 2) el polímero se ablanda, el módulo cae alrededor de tres órdenes de magnitud y el material se vuelve gomoso. En esta zona ya existen ciertos movimientos moleculares por lo que la deformación producida por un mismo esfuerzo es mucho mayor que en el caso anterior, y esto provoca una brusca caída del módulo de Young.

La región 3 se conoce como zona elástica (meseta gomosa) y está presente sólo en los polímeros de alta masa molecular y/o entrecruzados, ya que los de baja masa molecular pasan directamente de la transición vítrea a la fluencia. En esta zona no existe todavía movimientos traslacionales de las cadenas por lo que si estas son largas (alto peso molecular del material), se producen “enganches” entre ellas que actúan como entrecruzamientos (propios de los sólidos elásticos o elastómeros). La presencia de núcleos cristalinos también permite la creación de estos puntos de entrecruzamiento. En esta zona el material se comporta como un sólido elástico. En las regiones 4 y 5, denominadas flujo gomoso y flujo viscoso (López, 2004, p.17), se encuentran en la zona de fluencia, en la cual el movimiento molecular es tan grande que los entrecruzamientos no pueden

impedir el flujo del material. En la Tabla 2.2 se muestran ejemplos de cada región.

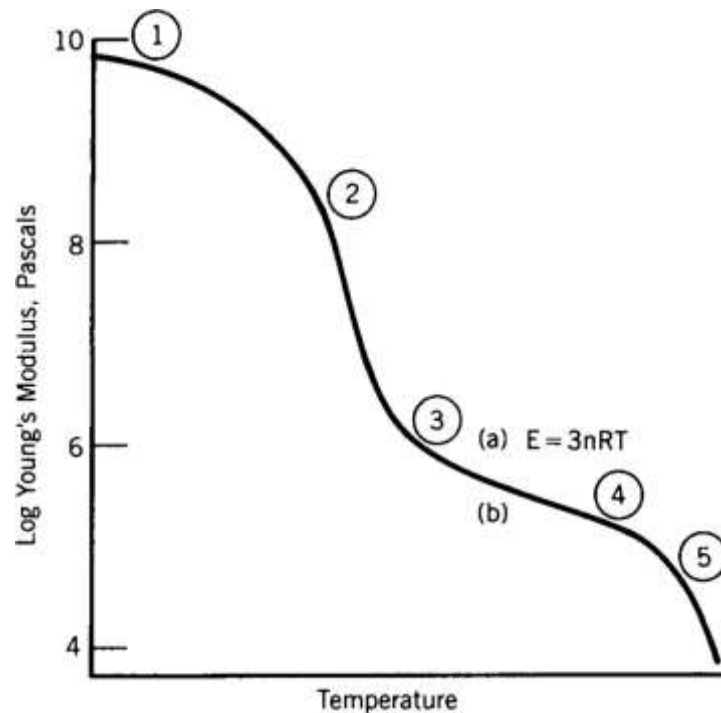


Gráfico 2.6: Comportamiento módulo-temperatura idealizado de un polímero amorfo. El eje vertical está en escala logarítmica.

Fuente: Sperling 2005, p.6.

Tabla 2.2 : Comportamiento viscoelástico típico del polímero a temperatura ambiente.

Región	Polímero	Aplicación
Vidrioso	Metacrilato de metilo	Plástico
Maseta gomosa	Poliestireno	Goma
flujo gomoso	chicle	Goma chiclosa
Flujo viscoso	Poli(dimetilsiloxano)	Lubricantes

Fuente: Sperling, 2005, p.9.

El comportamiento de la tensión-deformación (stress-strain) se muestra en el Gráfico 2.7 La primera curva, plástico quebradizo (brittle plastic), es específico para las zonas 1, 2 y 3 donde los polímeros son rígidos, quebradizos, y se rompen después de un pequeño porcentaje de extensión. En cambio, para la segunda curva, plástico resistente (tough plastic), específico para la región de transición vítrea 4 y 5 son más extensibles y exhiben un punto de fluencia (la joroba en la curva de tensión-deformación del plástico resistente). La curva de elastómero no corresponde a ninguna región del Grafico 2.6 ya que los elastómeros se forman por encima de su temperatura de

transición vítrea y se comportan como caucho, esto se debe a que el módulo de Young de los elastómeros es más alto que del resto de los polímeros.

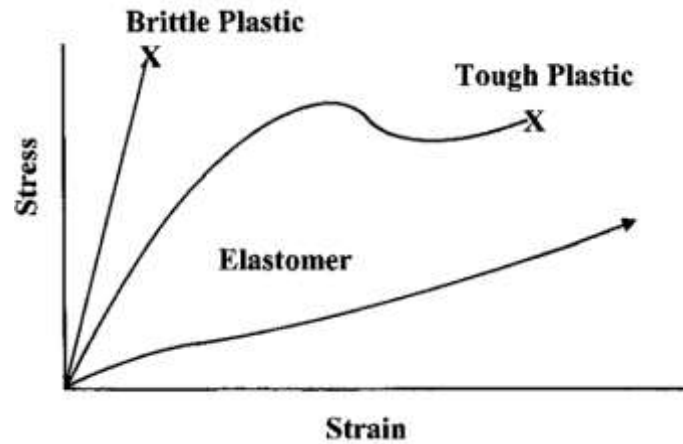


Gráfico 2. 7: Comportamiento tensión-deformación, la pendiente el módulo, el área bajo la curva proporciona la energía de fractura.

Fuente: Sperling 2005, p.9.

2.3.4 Clasificación polímeros

Según Hermida (2011, p.34) los materiales poliméricos se pueden clasificar de diferentes maneras, ya sea por el módulo-temperatura o la estructura que posean (Gráfico 2.8):

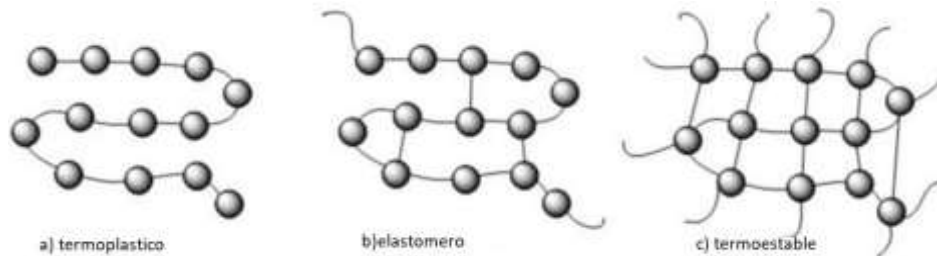


Gráfico 2.8: a) Termoplástico con estructura lineal sin entrecruzamiento, b) Elastómero con estructura entrecruzada semiabierta c) Termoestable con estructura entrecruzada cerrada.

Fuente: Noguera, 2021.

- **Termoplástico:** a temperaturas muy elevadas este tipo de polímero se comporta de manera plástica; sus enlaces, al variar su temperatura, no modifican a la estructura de manera radical, es decir al ser enfriado y luego calentado, no se ve afectado el comportamiento del polímero. Esto es debido a que sus estructuras son lineales, es decir las macromoléculas no se entrelazan; una característica especial es que pueden moldearse

y fundirse varias veces, lo que las convierte en aptos para el reciclaje. Para hacer que los termoplásticos sean más flexibles y elásticos se usan plastificantes que se mezclan cuando el termoplástico está fundido, estas sustancias disminuyen la temperatura de transición cristalina del polímero.

- Termorígidos: este tipo también se puede llamar termoestable o plásticos rígidos. La unión de sus enlaces, en este tipo de polímero, no permite que se los pueda procesar luego de haber sido polimerizados ya que la forma de su estructura es no lineal, sus enlaces están entrecruzados de forma cerrada. Estas cadenas son producidas por combinación de calor y presión durante la polimerización. Las ventajas de los termoestables son: alta estabilidad térmica, rigidez, resistencia a la termofluencia, deformación bajo carga, propiedades de aislamiento eléctrico y térmico, y peso ligero.
- Elastómero: también son denominados cauchos ya que su comportamiento puede variar de termoplástico a termorígidos. De forma ideal tienen la capacidad de deformarse al estirarlos y luego recuperar su forma original, esto es posible ya que las cadenas poliméricas se encuentran enredadas de forma abierta, al estirarlo las cadenas se pueden desenredar, y cuando se deja de estirar estas regresan a su forma y tamaño original. Pero los materiales no son ideales así que cuando se deja de aplicar esfuerzos para estirar al polímero puede quedar una deformación perpetua. Estos polímeros mantienen pesos moleculares altos, poseen una temperatura de transición vítrea muy baja, lo que genera alta flexibilidad de cadena, a nivel molecular se produce el “estiramiento” en las cadenas en dirección del esfuerzo que se realiza, estas cadenas vuelven a su estado original una vez que se deja de aplicar este esfuerzo, como se representa en el Gráfico 2.9.

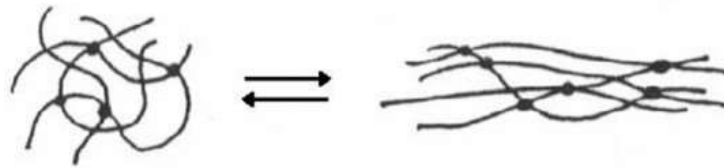


Gráfico 2.9: Deformación elástica en un elastómero.

Fuente: López, 2004.

2.3.5 Almidón como polímero termoplástico

El almidón se encuentra generalmente en las plantas en forma de gránulos. Los tamaños, formas y estructuras del almidón varían con el origen del almidón; el tamaño del diámetro de estos gránulos se encuentra desde menos de 1 μm hasta más de 100 μm ; las formas de los gránulos de almidón son varias: redondas, ovaladas o totalmente irregulares (Rahul, 2019, p.8). El almidón por naturaleza es hidrófilo ya que las moléculas de agua pueden penetrar en la estructura interna del almidón, lo que da como resultado la hinchazón del almidón en el agua, esto por su forma estructural entrecruzada similar al representado en el Gráfico 2.10.

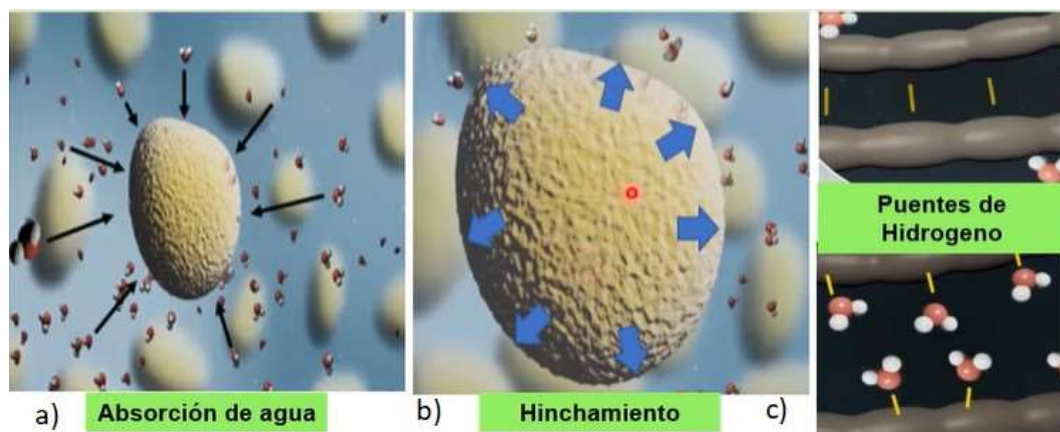


Gráfico 2.10: Proceso de gelatinización. Las moléculas de agua se unen a los gránulos de almidón mediante los puentes de hidrógeno que están libres.

Fuente: Youtube, Joshelote, 2020.

Si el almidón se disuelve en agua y se calienta a temperatura de entre 60 y 100°C durante un buen tiempo este se hincha, por encima de 250°C los gránulos de almidón se hunden endotérmicamente, y luego si se lo dejara enfriar se puede reorganizar algunos de los enlaces de hidrógeno que pueden volver a formar la pasta grumosa de almidón.

Las fuentes más usadas para la obtención de almidón son los granos de cereales, leguminosas, tubérculos, y frutas inmaduras o verdes. De manera estructural, el almidón tiene dos polisacáridos: la amilosa y la amilopectina. La amilosa es un polímero lineal no soluble en agua que puede formar gránulos hinchados por hidratación ya que tiene la virtud de enlazar moléculas vecinas por puentes de hidrógeno. El polisacárido amilopectina es un polímero de estructura ramificada, es parcialmente soluble en agua caliente y en presencia de yodo produce un color rojizo violeta (Gonzales, 2014).

Los gránulos de almidón son polímeros semicristalinos, su cristalinidad es dada por cadenas ramificadas de la amilopectina. Se puede conseguir un polímero termoplástico del almidón a partir de la gelatinización, la temperatura que se usa para gelatinizar es propia para cada tipo de almidón y depende fuertemente de la transición vítrea del almidón, es decir como muestra en el gráfico 2.6 se pasaría de la región rígida (1,2,3) a las regiones de transición vítrea 4 y 5 con módulo de elasticidad relativamente bajo. Durante el proceso de gelatinización suceden varios fenómenos: los gránulos pierden su cristalinidad y se hinchan debido a su solubilidad con el agua; si las muestras continúan calentándose a temperaturas muy elevadas, la amilosa se solubiliza y las cadenas se rompen.

Según la información recolectada por Gonzales (2014, pp.2-20) y Mina (2012, pp.3-5), las propiedades funcionales al modificar el almidón son: a) la viscosidad que se obtiene al mezclar el almidón en solución acuosa, para posteriormente calentarlo en su temperatura de transición vítrea; b) la claridad, es un atributo importante que varía según el origen del almidón, es decir según la proporción que tenga de amilosa/amilopectina, y puede ser alterada por modificaciones químicas y por la adición de solutos; c) el hinchamiento y solubilidad obtenido al poner en contacto el almidón con agua a temperatura elevada, los gránulos se hinchan y una porción del almidón se disuelve en el medio acuoso circulante, el grado de hinchamiento dependerá fuertemente de la temperatura en que estemos procesando el almidón; d) la gelatinización que se adquiere cuando los gránulos son calentados en agua a temperaturas mayores, se alcanza un punto donde los gránulos hinchados presentan un fenómeno irreversible y a medida que se eleva la temperatura los gránulos hinchados pierden el orden estructural debido a la desintegración de los cristales; e) la retrogradación que se produce después de la gelatinización, la solución se enfría y las moléculas de amilosa se asocian a través de la formación de puentes de hidrógeno con otras moléculas de amilosa cercana, es decir las moléculas de amilosa comienzan a perder agua que estaban retenidas en el gel y se forman enlaces de hidrógeno para formar estructuras visco-elásticas firme y rígidas, la retrogradación depende de: el origen del almidón, la concentración de almidón, y los regímenes de calentamiento y enfriamiento. La repetición de ciclos de congelamiento es un proceso muy

usado para acelerar la retrogradación; f) el almacenamiento obtenido cuando el almidón que llega a ser amorfo después de la gelatinización. Cuando se procede a enfriar las muestras, estas sufren cambios estructurales ya que la amilosa y la amilopectina se recristalizan y esto los vuelve más rígidos según la aplicación que se busque.

Un ejemplo para entender esta teoría la podemos ver en la investigación realizada por Gonzales et al. (2014, p.23) donde se mide las propiedades físicas del almidón de camote las cuales son bastante interesantes. La investigación es una recopilación de varios experimentos y se encontró que las propiedades del almidón de camote eran superiores al almidón de plátano, oca y manga, tanto en peso molecular como en sus propiedades funcionales; en un segundo experimento se sometió al camote a distintos procesos de gelatinización, donde se variaba la temperatura de proceso. El almidón oxidado al 0.15 % de permanganato de potasio alcanzó una temperatura máxima de gelatinización a 75 °C, presentando mejores cualidades de poder de hinchamiento.

Al almidón como termoplástico se lo puede obtener mediante la adición de plastificante, generalmente glicerol. En primer lugar, se mezcla los gránulos de almidón con agua para que estos se hinchen hasta una temperatura máxima, y luego se procede a añadir el plastificante; todo esto se debe hacer en presencia de calor y ahitamiento. La principal característica de este termoplástico es que se degradan bastante rápido en el agua y, dependiendo de la aplicación en la industria, podría ser una ventaja como una desventaja (Agrega, 2018).

2.3.6 Fibras naturales como refuerzo polimérico

Desde el principio de los tiempos, la necesidad del ser humano por cubrir su cuerpo de las diferentes etapas climáticas ha promovido el uso de fibras naturales, las cuales se obtienen de vegetales o animales. Durante milenios el uso de fibras fueron la única fuente de materiales textiles o papeleros.

Desde el siglo XIX la revolución agrícola e industrial han alterado el esquema, nuestras necesidades o vanidades han aumentado, y la problemática ambiental también. El ideal a seguir por las empresas a nivel mundial debería ser fabricar materiales amigables con el medio ambiente. En el sector rural de América latina, muchos pueblos subsisten de la comercialización de productos elaborados de estas fibras, generalmente destinado para generar artesanías para turistas. Los materiales que tiene como refuerzo de sus compuestos las fibras naturales son innovadores, baratos, ligeros, y sobre todo tiene propiedades tanto físicas como químicas deseadas. En Alemania el método más usado es la producción de autopartes plásticas reforzados con fibras

naturales mediante el moldeo por presión (Majewski T, Błędzki A, 2013, pp.1-7). Un ejemplo de esto es el modelo Mercedes Benz, con 54 componentes de fibra de abacá, o el modelo Ford que usa el 20% de plástico reforzado con paja de trigo o espuma de soya (Gráfico 2.11).



Gráfico 2.11 : Modelo automóvil con componentes a base de fibras naturales.

Fuente: Majewski T, Błędzki A, 2013.

2.3.7 *Procesamiento de materiales por moldeo termo-compresión*

El moldeo por compresión es un método de procesamiento de materiales en la que se coloca un material conjuntamente en un molde de metal. Este molde se calienta y se aplica presión para forzar al material a entrar en contacto con todas las áreas del material en el molde; el calor y la presión se aplica hasta que el material moldeado se ha curado. Este método es de alta presión, eficiente para realizar piezas complejas y compuestas. Los materiales termoplásticos, deben ser moldeados con refuerzos ya sea con cintas, tejidos, fibras o hilos (Hermida, 2011, p.40).

Girones et al. (2012, p.12) fabricaron sus compuestos por procesamiento por fusión, donde se hizo funcionar una termo-prensa Carver durante 10 minutos a 150 °C. Sus probetas de ensayo medían 210x 160x 2 mm de acuerdo a la norma ASTM D638.

2.4 **Bases Conceptuales**

2.4.1 *Biocompuestos poliméricos*

Los biocompuestos más comúnmente encontrados son compuestos de polímeros sintéticos reforzados con fibras naturales (Rahul, 2019, pp. 2-14). Estos tipos de compuestos han ganado mucha

popularidad debido a la creciente conciencia medioambiental; debido a que las propiedades mecánicas de fibras naturales son buenas en comparación con las fibras sintéticas (Brenes, 2014, p.21), han llevado a la comunidad de investigadores de todo el mundo a buscar fuentes alternativas de fibras sintéticas que se utilizan convencionalmente como refuerzos en matrices poliméricas. También son investigados por ser biodegradables y renovables, esto representa un reemplazo potencial de las fibras sintéticas por las naturales.

Entre varias fibras naturales, la cabuya y el fique parecen ser los que presentan mejores propiedades mecánicas (Khan, 2013; Agreda, 2018). Generalmente en Latinoamérica estas fibras están disponibles comercialmente, y por el alto contenido de celulosa hace que sean un buen refuerzo en la matriz polimérica, (Rahul, 2019; Brenes, 2014; Saravanan, 2013; Rua, 2019; Srimivasa 2011). Sin embargo, la fibra de cabuya también tiene sus desventajas al igual que otras fibras naturales: tiene una alta sensibilidad a la humedad, poca estabilidad dimensional y baja resistencia térmica; esta situación fomenta la modificación de fibras naturales para que tenga una mejor adhesión la matriz. En la investigación de Khan et al. (2013, p.12), se adoptó métodos para mejorar la adhesión entre fibra y matriz mostrando que las telas de cabuya tratadas con KMnO_4 (permanganato de potasio), optimizadas con un posterior tratamiento en solución de Metacrilato de 2-hidroxietilo y urea, producen una mejora prometedora en las propiedades mecánicas de los compuestos. Otra técnica diferente utilizada para tratar a la fibra fue la copolimerización de metacrilato de metilo sobre fibras de cabuya desengrasadas, donde se encontró una mejor adhesión de fibra/matriz en cabuya tratado con KMnO_4 .

Las fibras naturales de cabuya se han utilizado anteriormente como refuerzo para materiales de matriz termoestables y termoplásticos. Se observan algunas características importantes: se puede mejorar la estabilidad térmica y la adhesión en la matriz si la fibra es tratada con KMnO_4 en un medio ácido (Khan, 2013; Brenes, 2014); las propiedades mecánicas y estructurales del compuesto se mejoran si se logra optimizar los parámetros del proceso mientras se fabrican los compuestos, es decir, a presión y temperatura estables (Saravanan, 2013, p.10); es más barato y muy recomendado procesar el compuesto mediante el método de moldeo por compresión (Srimivasa, 2011; Saravanan, 2013; Rua, 2019).

En los últimos años se ha investigado el sustituto de la resina sintética y los investigadores prefieren el almidón debido a su bajo costo y por su ligereza (Rahul, 2019, p.3); el almidón al ser reforzado con fibras naturales se convierte en un polímero más resistente, esto se puede constatar en varias investigaciones (Rua, 2019; Gonzales, 2014; Torres, 2007; Luna, 2009; Mina, 2012; Ayala, 2015; Girones, 2012) donde podemos ver que un aspecto importante es que el peso de la fibra debe estar entre 10% a 15%, no debe ser superior ya que se forman grumos y vacíos en la muestra (Torres,

2007, p.15).

En ciertas investigaciones se usó el almidón de yuca reforzado con fibras naturales. Por ejemplo, Ayala (2015, p.23) formó una matriz polimérica con fibra de caña de azúcar; se creó una mezcla de la fase de fibra y almidón de manera compacta y rígida, según la norma ASTM D3039, para generar las probetas para los ensayos de impacto Charpy. En cada probeta de ensayo se usó aproximadamente un 20% en la carga de fibra y el mejor comportamiento se obtuvo cuando se utilizaron 70% de glicerina, 18% de almidón y 12% de agua, calentando la mezcla a 67 °C por 15 minutos, y se moldeó por compresión a 5MPa a una temperatura de 180 °C por 20 minutos. Los resultados al momento de hacer las pruebas de impacto no fueron tan favorables porque las muestras se rompían aun antes de caracterizar el material; una solución a esto fue cambiar el tipo de fibra, bajar el porcentaje de la carga de la fibra, y variar de manera más eficiente la temperatura y la presión cuando se moldea la muestra.

Por otro lado, Luna (2009, p.2) mezcló almidón de yuca con 20% de plastificante. Se realizó varias muestras con fibras de cabuya libres de impurezas y una muestra sin refuerzo y obtuvo que la temperatura de transición vítrea era muy baja sin refuerzo de la fibra; esto es debido a que agregar contenido de fibra interfiere en la separación de las moléculas de agua del gránulo del almidón. También hizo variaciones de la carga de fibra entre 10 y 20% y obtuvo que los mejores resultados se encuentran si se usan cargas de 10% y 15%.

Mina (2012, p.4) antes de preparar el polímero dejó secar a 80 °C el almidón de yuca por 24h, luego plastificó con glicerol en una relación de 70:30 en masa durante 5 minutos; a las fibras de fique se las modificó superficialmente con un tratamiento alcalino con hidróxido de sodio, y se realizó una caracterización química por separado tanto de las fibras de cabuya como del plástico que sale del almidón. Las fibras con tratamiento alcalino resultaron tener mejor resistencia al corte.

Torres et al. (2007, p.7) variaron el porcentaje de fibra de bagazo de yuca de 0 a 15% del peso de los compuestos, y utilizaron temperaturas de 130, 150 y 175°C. Ellos demostraron que a la temperatura de 175°C la resistencia al impacto disminuía drásticamente.

En resumen, las mejores alternativas para tener un buen compuesto de almidón de yuca son: dejar secar al almidón antes del proceso de gelatinización, plastificarlo con glicerina a una temperatura entre 70 a 80 °C, unificar el almidón plastificado con la fibra de cabuya variando la carga de fibra de 10% a 15% en peso del compuesto, y preparar las muestras mediante moldeo por compresión a temperaturas no más de 175 °C.

2.5 Moldeo por compresión

Este método se ha utilizado anteriormente tanto para materiales termoestables como para termoplásticos. Torres et al. (2007, p.8) usaron un molde macho-hembra con dimensiones de 110x19x6 mm que sirven para hacer una buena caracterización mecánica; las temperaturas de procesamiento utilizadas para el prensado en caliente fueron de 130, 150 y 175 °C, las cuales son mayores que las temperaturas de transición vítrea tanto del almidón de papa (152 °C), como del glicerol (87 °C); los tiempos de moldeo variaron entre 25 y 45 min.

Luna (2009, p.5) moldeó sus muestras de polímero mediante este método realizando mezclas de almidón de yuca y glicerol reforzado con fibra de fique; las muestras fueron sometidas a temperaturas de 150-160 °C durante 15 minutos, y luego del curado se agrega las mezclas a las probetas de pruebas de impacto para su respectiva caracterización.

2.5.1 Caracterización de polímero termoplástico

La caracterización es el procedimiento donde se recogen las propiedades morfológicas y mecánicas de determinados materiales, para dar a conocer información sobre los compuestos (Hermida, 2011, p.6).

Las propiedades mecánicas son de gran importancia en la valoración de eficiencia de cualquier compuesto biodegradable. Los polímeros varían considerablemente sus propiedades dependiendo del grado de cristalinidad, entrecruzamiento o una alta temperatura de transición vítrea. No en todas las investigaciones se ha realizado el mismo procedimiento de caracterización, por ejemplo Torres et al. (2007, p.12), luego de procesar las muestras, permitieron que estas alcanzaran la temperatura ambiente (20°C) durante unas 3 h, luego fueron almacenadas en bolsas de plástico herméticas durante un máximo de 10 días hasta que se realizó la respectiva caracterización; se hicieron ensayos de tracción con una velocidad de cruceta de 5 mm/min, según la norma ASTM D3039; las pruebas de impacto se realizaron en una máquina Hounsfield siguiendo el procedimiento estándar ASTM D256; para caracterizar morfológicamente, se utilizó un microscopio estereoscópico trinocular para caracterizar los defectos de procesamiento como huecos y aglomeraciones de fibras, y las muestras con mayor contenido de vacíos se descartaron; se utilizó un microscopio electrónico de barrido Phillips (SEM) para caracterizar las superficies de fractura y su porosidad.

Luna (2009, p.23) investigó las características principales de su compuesto polimérico a partir de varios métodos, bajo la norma ASTM D638 para pruebas mecánicas (esfuerzo y elongación). Los

análisis se realizaron en un L&W Tensile Tester, SE062 de marca Lorentzen & Wettre de Cartones de Cartago S.A, se usó la máquina de microscopía óptica MOAR de marca NIKO MICROPHOT, y por último se hicieron pruebas en el equipo DSC de calorimetría diferencial de barrido marca TEXAS; las muestras pesaban de 6 a 8 mg y se usaron temperaturas desde -30 °C hasta 200 °C.

Otra investigación importante fue de Girones et al. (2012, p.8), quienes luego de procesar a su compuesto realizaron diferentes pruebas: tensión-deformación en la máquina Emic DL 3000 de acuerdo a la norma ASTM D638M-90; análisis térmico mecánico-dinámico, en un instrumento DMA2980, con muestras de 35x5x1mm y temperaturas entre 110 a 200 °C con pasos de 5 °C; estudio de superficie de fractura con la máquina de microscopía electrónica de barrido LEO440; análisis de rayos X para observar la cristalinidad, con la máquina de rayos X Carl-Zeiss-Jena, URD6 X-ray en intervalos de 5 a 40° en la medida del ángulo difractado 2θ .

CAPÍTULO III

3 MARCO METODOLÓGICO

3.1 EXPERIMENTACIÓN

3.1.1 *Tratamiento de la fibra de cabuya*

Según Khan et. al. (2013, p.4) el permanganato de potasio KMnO_4 , aumenta la adhesión entre fibra/matriz, ya que KMnO_4 en medios ácidos actúa como agente oxidante provocando cambios químicos y físicos en las fibras. Los principales productos oxidados de la celulosa son el aldehído, la cetona, y el grupo carboxilo en la posición C-6 de la unidad de celulosa. La oxidación promueve la aspereza de la superficie de la fibra y causa fragilidad dependiendo de la fuerza de los oxidantes y el tiempo de reacción.

Basado en los resultados obtenidos por Khan et. al. 2013, para el tratamiento de la fibra de cabuya, se realizó una solución en agua destilada que contiene una concentración de ácido oxálico del 5% m/v y de permanganato de potasio de 0.1% m/v, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\% \frac{m}{v} = \frac{M_{\text{soluto}}}{V_{\text{solución}}} \cdot \% \text{pureza}$$

de donde se obtiene

$$M_{\text{soluto}} = \frac{\% \frac{m}{v} \cdot V_{\text{solución}}}{\% \text{pureza}}$$

En estas ecuaciones, %m/v representa el porcentaje de masa volumen de permanganato de potasio para la solución y %pureza el porcentaje de pureza del soluto.

Los pasos que se siguieron para la preparación del soluto fueron los siguientes:

- Por cada 100ml de solución medir 4g de fibra de cabuya, las fibras tienen un largo de 2-4 cm.
- Medir la masa de ácido oxálico y permanganato de potasio correspondiente al porcentaje de solución de cada muestra (ver Gráfico 3.1).



Gráfico 3.1: Medidas de masa experimentales para tratamiento de la fibra para una solución de 100ml.

Realizado por: Altamirano 2022.

- Mezclar la solución de ácido oxálico con agua destilada (50ml por cada 5 g) en un agitador magnético con temperatura de 50°C hasta que todo se disuelva, con agitación media (ver Gráfico 3.2).



Gráfico 3.2: Mezcla agua destilada con ácido Oxálico.

Realizado por: Altamirano, 2022.

- Mezclar el permanganato de potasio con agua destilada (20 ml por cada 0.01g) con temperatura ambiente hasta que todo se disuelva (ver Gráfico 3.3).



Gráfico 3.3 Mezcla agua destilada con permanganato de potasio.

Realizado por: Altamirano, 2022.

- Mezclar ambas soluciones en un balón de aforo, y añadir agua destilada hasta completar la solución (ver Gráfico 3.4).



Gráfico 3.4 Solución de 100 ml en un balón de aforo.

Realizado por: Altamirano, 2022.

- Añadir la solución al vaso de precipitación que contiene a la fibra, durante 2 a 3 minutos (ver Gráfico 3.5).



Gráfico 3.5: Reacción de la disolución con la fibra de cabuya, se puede ver el cambio de color de la disolución con el tiempo.

Realizado por: Altamirano, 2022.

- Lavar la fibra con agua destilada durante 30 minutos (ver Gráfico 3.6)



(a)

(b)

Gráfico 3.6: a) Lavado de las fibras b) residuos del tratamiento.

Realizado por: Altamirano, 2022.

- Guardar los desechos en un envase para que no contaminen el medio ambiente.
- Secar las fibras en una bandeja de aluminio, dentro de un secador a 105°C durante 4-6 horas.
- Dejar en un desecador de 3-24 horas

3.2 Caracterización química del almidón de yuca

Para realizar las diferentes caracterizaciones se utilizó la guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca realizado por Aristizábal J, et al (2007, pp. 65-91).

3.2.1 pH

El valor del pH es una medida del grado de fermentación del almidón. Si es menor a 4 es una fermentación ácida y no consumible. El valor aceptable del pH de un almidón nativo debe estar entre 6 y 6,5. Para la caracterización se realizó el siguiente procedimiento:

- Pesar 20g de almidón, luego mezclar con 100ml de agua destilada recién hervida a 25 °C.
- En un agitador magnético mezclar durante 30 minutos con una frecuencia media.
- Filtrar con papel filtro la mezcla.
- Determinar el pH del agua.

Caso 1:

Se compró Almidón de yuca en una tienda de barrio, el almidón fue traído de Manabí; en cuanto a su aspecto visual fue un poco sucio.

El pH obtenido de este almidón fue de 3.64, como se muestra en el Gráfico 3.7, es decir bastante ácido.



Gráfico 3.7: pH almidón sin marca.

Realizado por: Altamirano, 2022.

Caso 2.

Se compró el almidón de yuca de marca Karay, una empresa ecuatoriana, el cual en sus especificaciones data que es 100% natural, es decir nativa sin tratamientos químicos. El pH obtenido fue de 6.68, como se indica en el Gráfico 3.8.



Gráfico 3.8 : pH almidón marca Karay.

Realizado por: Altamirano, 2022.

Debido a que el pH del almidón de la marca Karay es bastante bueno, se realizaron el resto de solo con este almidón.

3.2.2 Humedad

- Pesar 10g de almidón.
- Secar en un horno a 105 °C por 2 horas.

Se pesó una masa inicial de 10.004g, luego del secado se obtuvo una masa final de 8,580g. De esta manera, el porcentaje de humedad es de:

$$\%Humedad = 100\% - \frac{M_{inicial}}{M_{final}} 100\% = 14.234\%$$

3.2.3 Viscosidad

El procedimiento seguido para obtener la viscosidad es la siguiente:

- Pesar 25g de almidón, luego mezclar con 500ml de agua.
- Prender baño maría y esperar a que el agua del baño maría hierva para poner la muestra.
- Mezclar la muestra que se gelifique (la temperatura en que se gelificó fue de 65°C).
- Enfriar el Gel de 20 a 25°C.
- Medir la viscosidad, con una velocidad de 10 RPM (Gráfico 3.9).



Gráfico 3.9: Viscosidad Almidón marca Karay.

Realizado por: Altamirano, 2022.

La Viscosidad Brookfield medida es de 21290 cP, a una temperatura de 22.7°C , aguja L4.

3.3 Experimentación de plastificación de almidón de yuca

Se utilizó el método de preparación de TPS de Sherif, M, et al, (2019, p.3), donde especifica que se debe mezclar almidón con glicerina (30% en peso de almidón seco) durante 10 minutos a 60°C, y luego añadir agua (20% en peso de almidon seco) por 5 minutos a 60°C, hasta obtener los TPS. Se siguió este procedimiento en un principio, pero la consistencia de este TPS no era buena, ya que el procedimiento en la literatura no era muy expreso. Por tanto, se realizaron varias muestras con diferentes procedimientos para poder averiguar cuando nuestro bioplástico tendría una mejor apariencia y consistencia. De las muestras 1-4, los porcentajes de almidón glicerina y agua son de 100, 20 y 30%, respectivamente.

3.3.1 TPS 1

La formulación 1 de los TPS se realizó a temperatura ambiente, mezclando glicerina con almidón hasta no observar grumos. Esta mezcla se calienta hasta que llegue a 60°C, se mezcla durante 10 min. y se deja enfriar. Se añade agua, se espera a que llegue a 60°C, y se mezcla por 15 minutos.

3.3.2 TPS 2

Para la formulación 2, se calienta glicerina hasta que llegue a 60°C, se añade el almidón, y se mezcla por 10 minutos. Se calienta agua aparte y cuando llega a 60°C se añade juntos el almidón y la glicerina, y se mezcla durante 5 minutos.

3.3.3 TPS 3

En la formulación 3, se mezcla agua con almidón en frío hasta que no haya grumos, se calienta hasta que llegue a 60°C, y luego se mezcla con glicerina caliente durante 5 minutos.

3.3.4 TPS 4

Para la formulación 4, se mezcla agua, glicerina y almidón a temperatura ambiente hasta que no haya grumos, se calienta la muestra hasta que llegue a 60°C y se mezcla hasta que se pueda observar el hinchamiento del almidón.

3.3.5 TPS 5

Finalmente, en la formulación 5 se utilizó porcentajes diferentes: almidón 50% de peso compuesto, glicerina 30% y agua 20%. Se procede mezclando la glicerina con el almidón en frío, se calienta hasta que llegue a 60°C , se mezcla por 10 minutos, y se añade agua fría a la mezcla hasta que llegue a 70°C durante 15 minutos hasta que se forme una masa.

3.3.6 Experimentación para la Obtención del plástico termorígido

En todas las soluciones se añadió agua con el TPS en proporción 1:3, peso total 36g, se lo dejó secar durante 2 horas a 105°C , como se observa en el Gráfico 3.10.



Gráfico 3.10 : (a) TPS (b) Emulsión TPS en agua.

Realizado por: Altamirano, 2022.





Gráfico 3.11: Muestras de los TPS.

Realizado por: Altamirano, 2022.

En el Gráfico 3.11 se presenta el resultado de los TPS obtenidos con las diferentes formulaciones. Se observó que la mejor consistencia tubo la muestra 2, 4, 5 y se realizó este procedimiento para formulaciones de almidón más grandes. El procedimiento para la muestra 2 fue fallido ya que necesitaba demasiado tiempo y los gránulos no se hinchaban. Las otras muestras, 1 y 3, se consideran fallidas ya que se encogieron demasiado y cualitativamente no son tan dispersas como el resto. Por lo tanto, se trabajó con las muestras TPS 4 y TPS 5.

3.4 Implementación del sistema de alimentación de calor en Prensa Hidráulica

En la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo se encuentra disponible una máquina hidráulica con una capacidad de fuerza de hasta 60 toneladas, actualmente se utiliza para la fabricación de piezas mecánicas. La prensa hidráulica no viene integrada con la máquina que genera calor, debido a este inconveniente se desarrolló un sistema de calor con el ingeniero Edwin Cárdenas, mecánico de la ciudad de Pujilí- Ecuador.

Previamente se desarrolló el diseño del sistema de calor en AutoCAD, con sus respectivas medidas, que se muestran en los Gráficos 3.12 – 3.19.

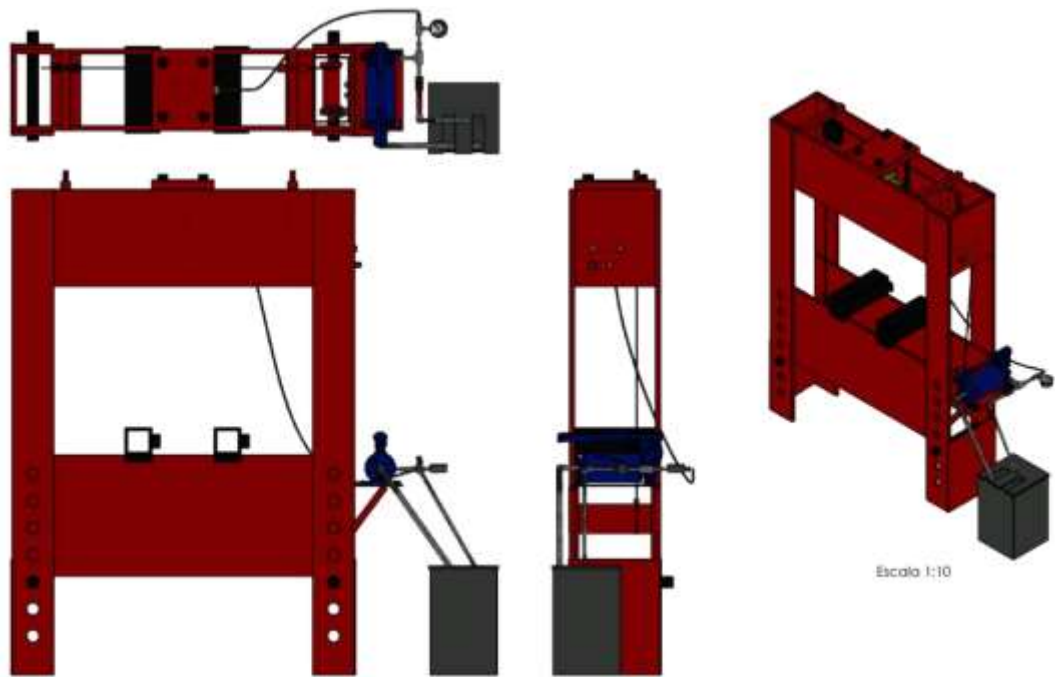


Gráfico 3.12: Prensa Hidráulica, del laboratorio de Soldadura de la Facultad de Mecánica.

Fuente: Quinancela, 2020.



Gráfico 3.13: Placa de aluminio de 5cm de espesor, peso 60.75kg.

Realizado por: Altamirano, 2022.

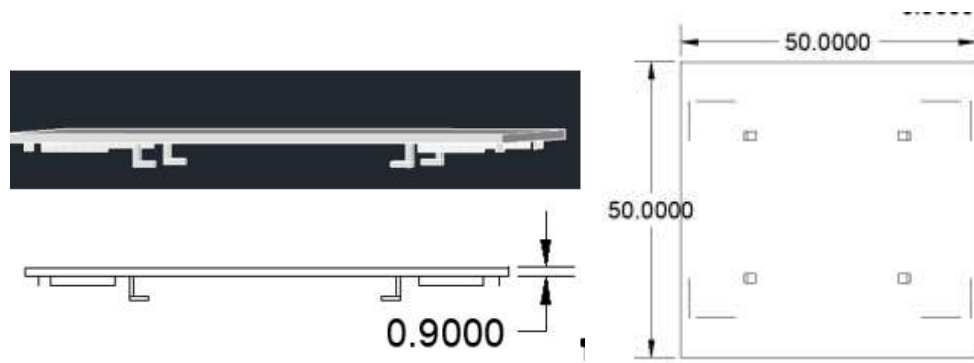


Gráfico 3.14: Placa 9mm con patas fijadoras que sostienen a la caja de calor.

Realizado por: Altamirano, 2022.

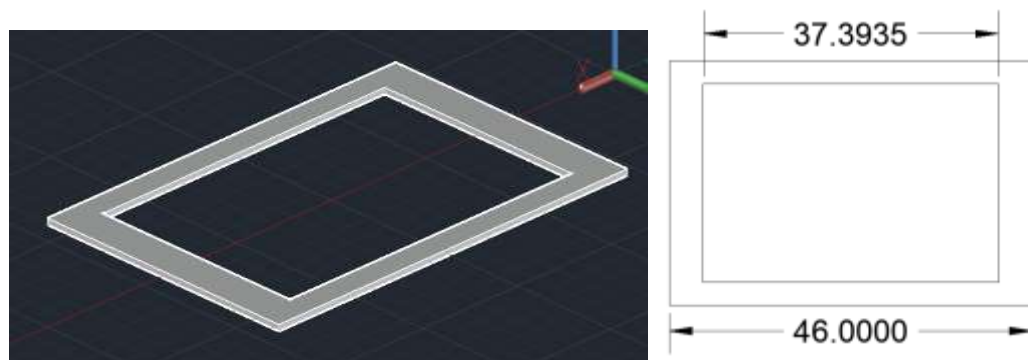


Gráfico 3.15: Molde para compuesto polimérico de grosor 3mm.

Realizado por: Altamirano, 2022.

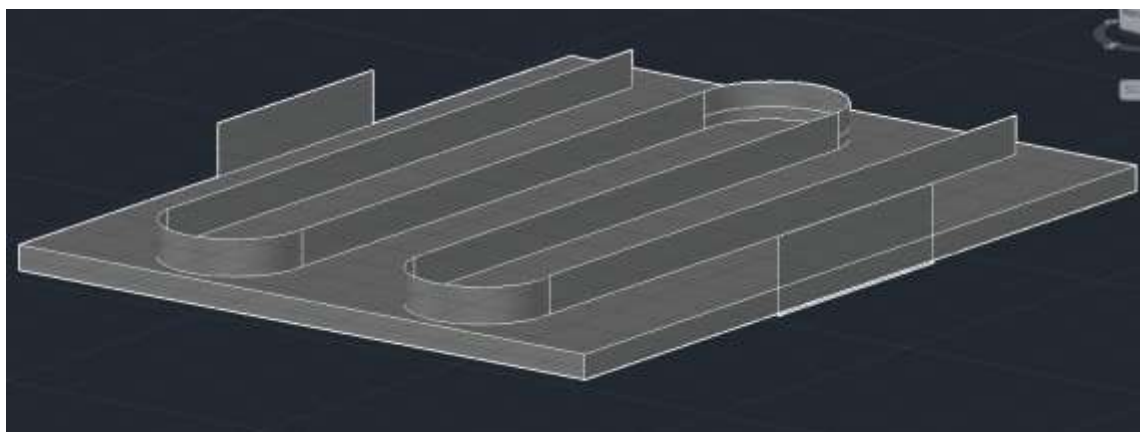


Gráfico 3.16: Resistencia eléctrica de 25cm de ancho 40 cm de largo y con potencia de 1000W apto para corriente alterna de 220V.

Realizado por: Altamirano, 2022.

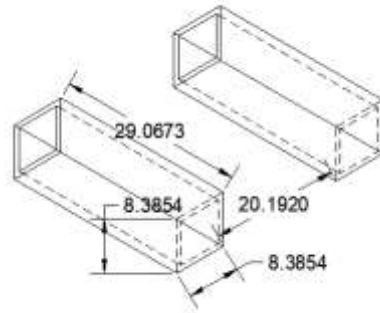
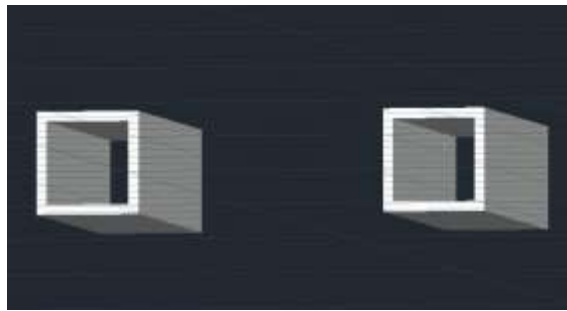


Gráfico 3.17: Bases fijadoras de la prensa hidráulica.

Realizado por: Altamirano, 2022.

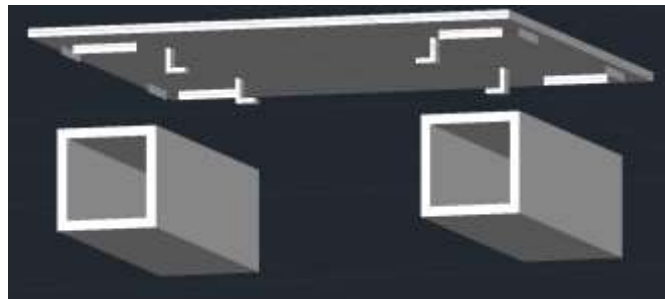


Gráfico 3.18: Estructura base fijadora con placa de 9mm.

Realizado por: Altamirano, 2022.

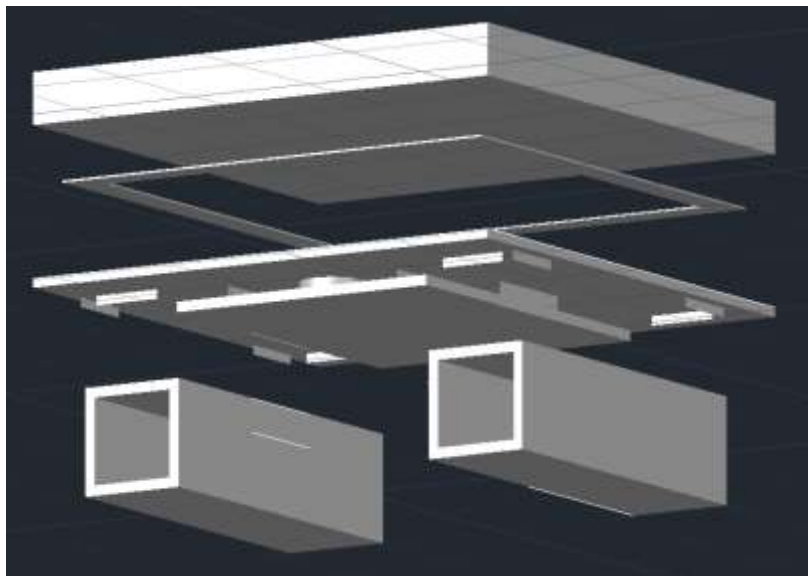


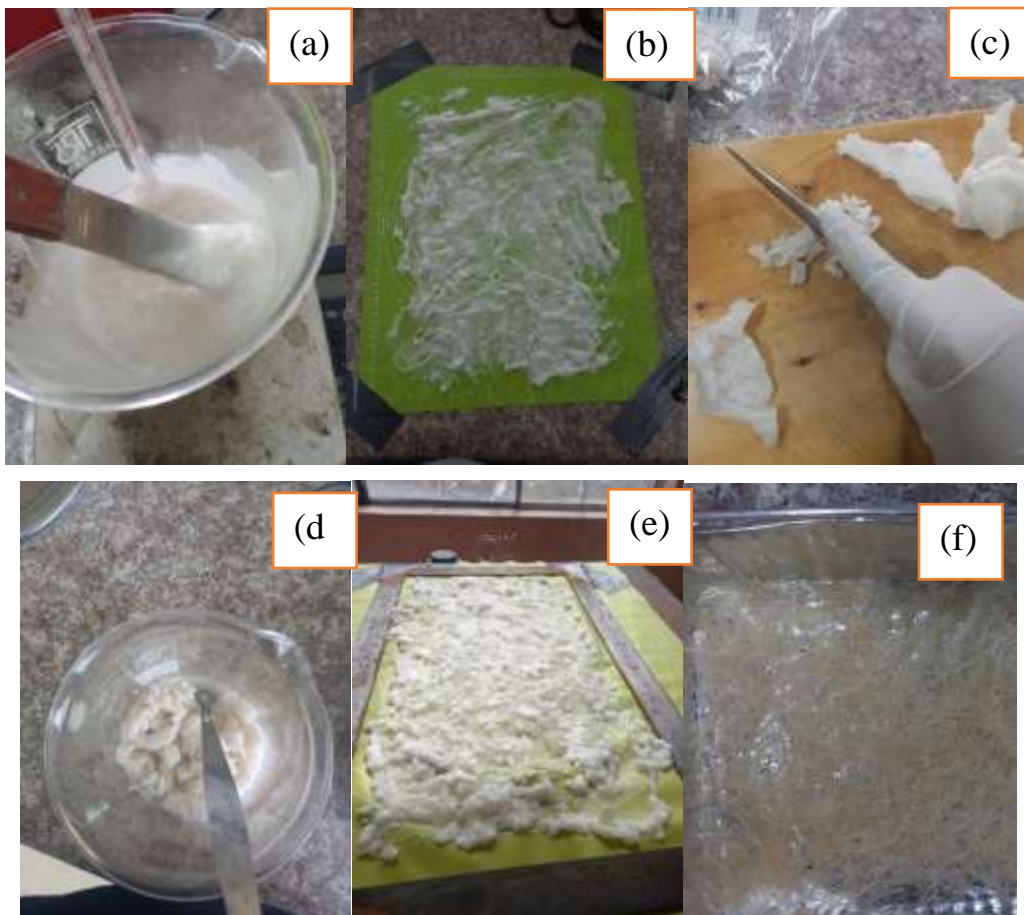
Gráfico 3.19: Diseño montado de máquina de calor con base fijadora y molde para presión.

Realizado por: Altamirano, 2022.

3.5 Moldeo por termo-compresión

3.5.1 Muestra 1

Para esta muestra se considera la formulación y proceso TPS 5. Usando 250g de almidón (siendo este el 50% de la mezcla), 30% de glicerina y 20% agua, se mezcla primero la glicerina con el almidón en frío, se calienta hasta que llegue a $60^{\circ}C$, se mezcla por 30 minutos, se añade agua fría a la mezcla hasta que llegue a $70^{\circ}C$ durante 35 minutos hasta que se forme una masa TPS (Gráfico 3.20a). Luego se dejar enfriar en una superficie plana (Gráfico 3.20b), se granula la masa con grosores de 1 a 3mm (Gráfico 3.20c), se emulsiona estos gránulos en agua en una proporción 1:1 durante 30 minutos (Gráfico 3.20d). Luego se pone la emulsión sobre el molde de prensado (Gráfico 3.20e), se calienta hasta $100^{\circ}C$ hasta que el agua se evapore (Gráfico 3.20f), se entrecruzan las fibras sobre la emulsión (Gráfico 3.20g), se prensa el compuesto con una presión de 4 MPa y una temperatura de $145^{\circ}C$ durante 30 minutos (Gráfico 3.20h), se deja de prensar y seguidamente se deja secar la muestra a $50^{\circ}C$ durante 4 horas obteniendo la muestra final mostrada en el Gráfico 3.20i.



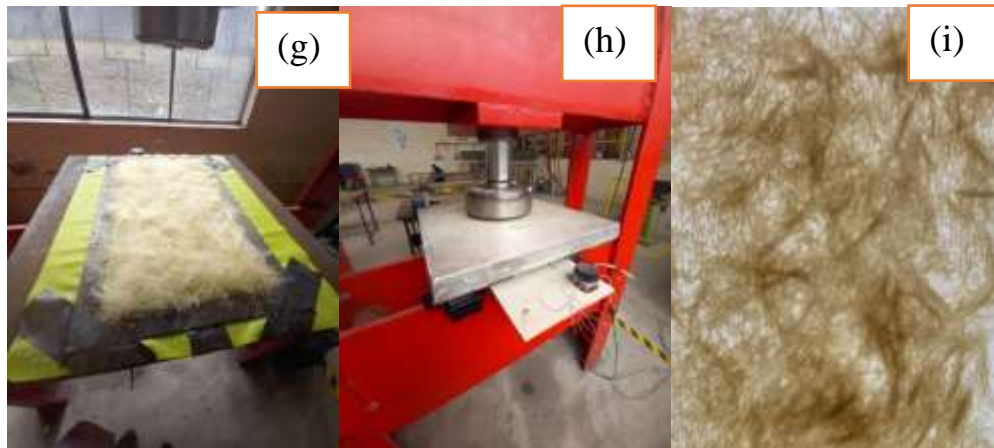


Gráfico 3.20: Creación elastómero muestra 1.

Realizado por: Altamirano, 2022.

3.5.2 *Muestra 2*

La formulación tomada para esta muestra fue TPS 4. Se tomó 200g de almidón que representa el 100%, mezclada con glicerina (30% en peso de almidón seco) y agua (20% en peso de almidón seco) a temperatura ambiente, después se mezclan los componentes hasta no observar grumos, se lo dispone a mezclar en baño María durante 1 hora hasta que la mezcla adquiriera uniformemente una temperatura de $60^{\circ}C$ (Gráfico 3.21a), para así observar como los gránulos de almidón se hinchan y se forma el TPS. Luego se deja enfriar la mezcla (Gráfico 3.21b), y se emulsiona el TPS con agua en una proporción de 1:2 durante 30 minutos (Gráfico 3.21c). Se entrecruzan las fibras debajo del molde de prensado (Gráfico 3.21d), se pone la emulsión a calentar a $100^{\circ}C$ hasta que el agua se evapore y se entrecruza la otra mitad de las fibras sobre la emulsión (Gráfico 3.21e), se prensa el compuesto a 3 MPa a una temperatura de $145^{\circ}C$ durante 40 minutos (Gráfico 3.21f), se deja de prensar y seguidamente se deja secar la muestra a $50^{\circ}C$ durante 4 horas (Gráfico 3.21g).

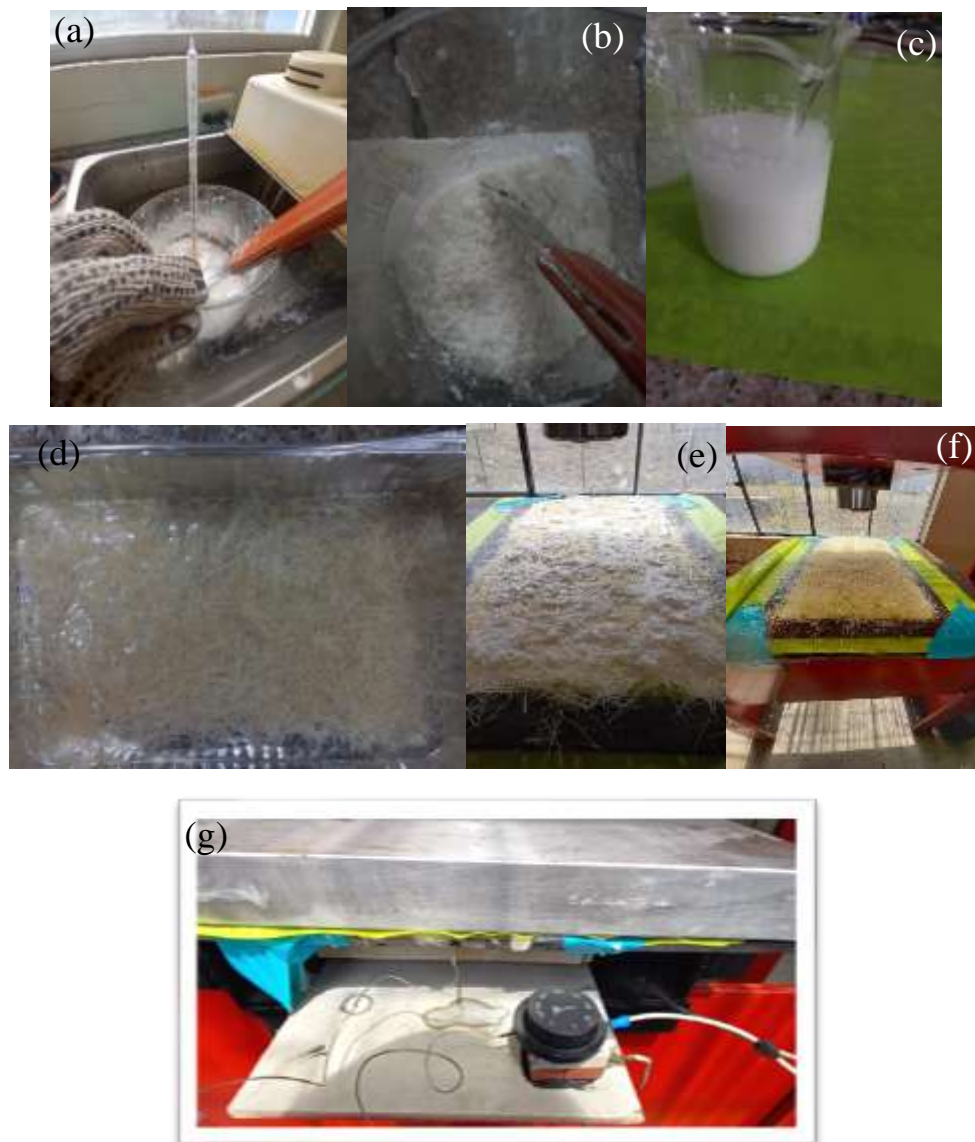


Gráfico 3.21: Proceso creación Elastómero Muestra 2.

Realizado por: Altamirano 2022

Debido a que las características de elasticidad palpable de las muestras 1 y 2 son bastante diferentes, se requirió investigar la razón. Las dos muestras tienen la misma temperatura de prensado ($145^{\circ}C$) y el mismo tiempo de secado (4 horas), por lo que la razón de su diferencia se podría deber a:

- Procedimiento de creación de TPS
- Proporción de TPS – agua

- Presión de moldeo
- Disposición de fibras sobre el compuesto

La Tabla 3.1 resume las diferencias entre cada muestra que se deberá seguir para investigar la razón de la diferencia entre ellas. Las disposiciones ABC y AB de las fibras se esquematizan en los Gráficos 3.22 y 3.23, respectivamente.

Tabla 3.1: Formulaciones de cada muestra

Muestra	TPS	Proporción TPS-agua	Presión MPa	Disposición fibras	Investigar
1	5	1:1	4	AB	--
2	4	1:2	3	ABC	--
3	4	1:1	3	AB	TPS+ proporción agua+ presión +disposición
4	4	1:1	4	AB	TPS+ disposición
5	4	1:1	4	ABC	TPS

Realizado por: Altamirano 2022

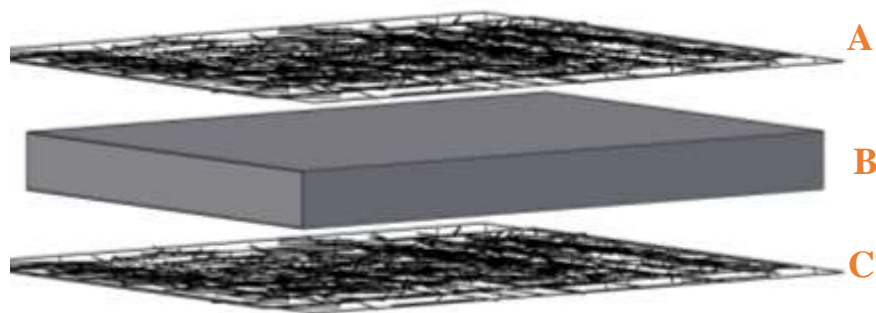


Gráfico 3.22: Disposición de fibras AB.

Realizado por: Altamirano, 2022.

3.5.3 Muestra 3

Se sigue exactamente el proceso de creación TPS 5 de la muestra 2. Se dejar enfriar la mezcla, se emulsiona el TPS con agua en una proporción de 1:1 durante 30 minutos. Luego se pone la emulsión sobre el molde de prensado, se calienta a $100^{\circ}C$ hasta que el agua se evapore, se prensa el compuesto a 3MPa a una temperatura de $145^{\circ}C$ durante 40 minutos, se deja de prensar y seguidamente se deja secar la muestra a $50^{\circ}C$ durante 4 horas.

En esta muestra se demostró que la proporción de agua y la presión a la que se realizaban las

muestras no influyen en la elasticidad palpable.

3.5.4 Muestra 4

Se sigue exactamente el proceso de creación TPS 5 de la muestra 2. Se deja enfriar la mezcla, se emulsiona el TPS con agua en una proporción de 1:1 durante por 30 minutos, se pone la emulsión sobre el molde de prensado, se calienta a $100^{\circ}C$ hasta que el agua se evapore, se prensa el compuesto a 4MPa a una temperatura de $145^{\circ}C$ durante 40 minutos, se deja de prensar y seguidamente se deja secar la muestra a $50^{\circ}C$ durante 4 horas.

En esta muestra se demostró que la disposición en que se ponen las fibras no influye en la elasticidad palpable.

3.5.5 Muestra 5

Se sigue exactamente el proceso de creación TPS 5 de la muestra 2. Se deja enfriar la mezcla, se emulsiona el TPS con agua en una proporción de 1:1 durante 30 minutos, se entrecruza las fibras debajo del molde de prensado, se calienta a $100^{\circ}C$ hasta que el agua se evapore, se entrecruza la otra mitad de las fibras sobre la emulsión, se prensa el compuesto a 4MPa a una temperatura de $145^{\circ}C$ durante 40 minutos, se deja de prensar y seguidamente se deja secar la muestra a $50^{\circ}C$ durante 4 horas.

En esta muestra se demostró que el proceso de elaboración de TPS si influye en cada una de las muestras.

CAPÍTULO IV

4 MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Caracterización mecánica (Ensayo Tensión por tracción)

Se recortaron 3 probetas de cada muestra en una máquina de corte laser en la ciudad de Salcedo. Las probetas deben seguir la norma ASTM D638-14 para plásticos rígidos (ver Gráfico 4.1).

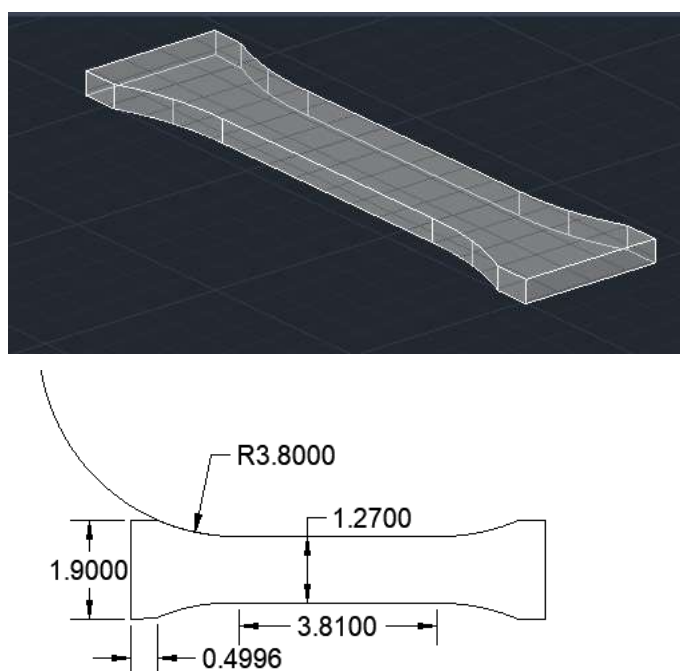


Gráfico 4.1: Unidades de corte correspondientes en centímetros.

Realizado por: Altamirano, 2022.

Con la máquina universal, disponible en el laboratorio de investigación de la Facultad de Ciencias, se realizaron las pruebas de tracción de 3 diferentes probetas de las 5 muestras. Las diferentes curvas de deformación vs esfuerzo son curvas no lineales que, y principalmente no siguen la ley de Hooke hasta la tensión de tracción σ_T (máximo de la curva deformación-esfuerzo). Entonces, para poder obtener una aproximación de la curva lineal, aproximamos estas curvas (hasta la deformación de tracción, ε_T , correspondiente a σ_T) con una función polinomial de la forma (Mejía-Burgos, 2021, pag.3):

$$\sigma(\varepsilon) = a_0 + a_1\varepsilon + a_2\varepsilon^2 + a_3\varepsilon^3 + \dots$$

tomando el orden más bajo de la aproximación que describa con precisión la parte elástica del

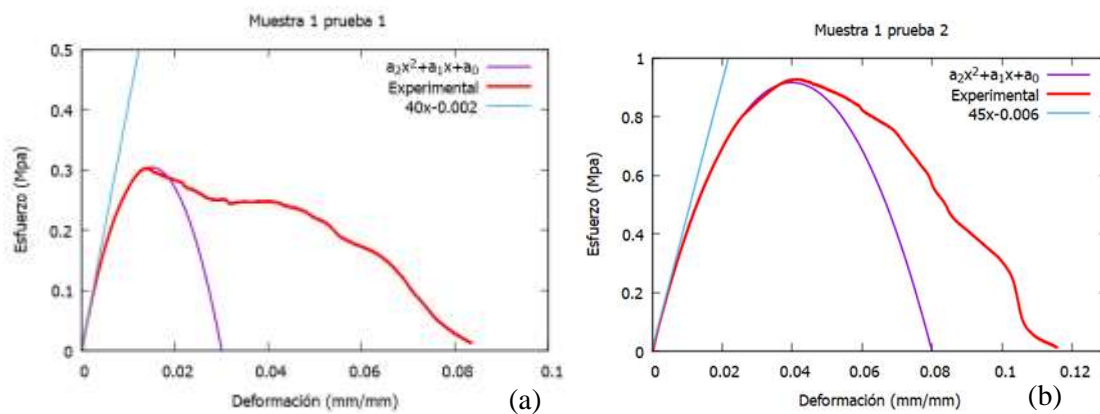
material.

Los resultados de deformación y esfuerzo en el límite elástico (ϵ_U y σ_U , respectivamente) y la deformación y esfuerzo en el punto de fractura (ϵ_F y σ_F , respectivamente) fueron obtenidos por el sensor de la máquina universal. Los resultados para el esfuerzo y la deformación de tracción (ϵ_T y σ_T , respectivamente) se establecieron mediante la utilización de Excel, y los datos de la curva polinomial, y sus respectivas gráficas fueron analizados con el programa Gnuplot. El dato a_1 de la aproximación polinomial corresponde al módulo de elasticidad E.

Tabla 4.1: Resultados de pruebas mecánicas muestra 1.

MUESTRA 1			
	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3
σ_U (MPa)	0.11625	0.157	0.10544
ϵ_U	0.00322	0.0035	9.00E-04
σ_F (MPa)	0.013	0.013	0.01333
ϵ_F	0.08349	0.11561	0.13458
σ_T (MPa)	0.30225	0.92644	2.38035
ϵ_T	0.01408	0.04164	0.04125
a_2 (MPa)	-1349.94 ± 3.056	-570.804 ± 1.394	-1626.85 ± 4.112
a_0 (MPa)	$-0.00208084 \pm 0.0001293$	0.00655115 ± 0.0005388	0.0372897 ± 0.001561
E (MPa)	40.6838 ± 0.04359	45.5601 ± 0.05986	123.216 ± 0.1751

Realizado por: Altamirano 2022



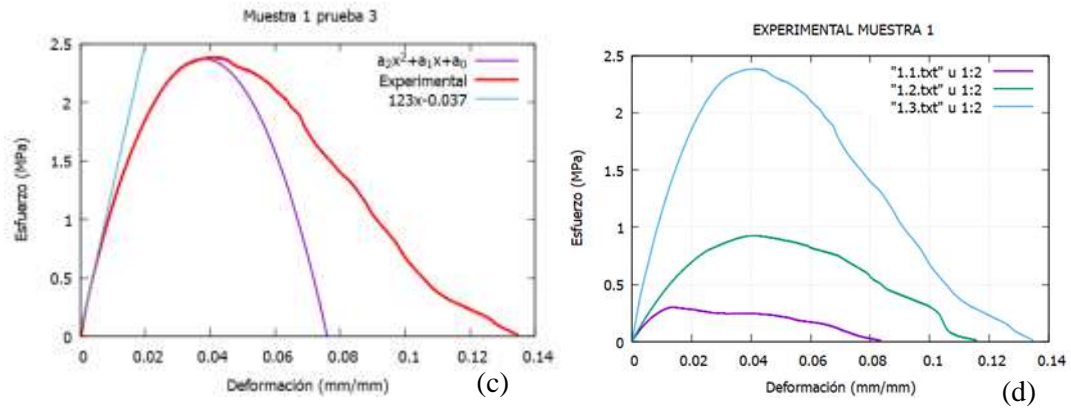


Gráfico 4.2: Curvas esfuerzo-deformación, muestra 1.

Realizado por: Altamirano, 2022.

La Tabla 4.1 y el Gráfico 4.2 muestran los resultados de las propiedades mecánicas de la muestra 1. Se observa que la probeta que tiene el mayor esfuerzo de tracción es la probeta 3, y el menor es el de la probeta 1. Por esta razón el punto de fractura es también mayor en la probeta 3. De la misma manera, el módulo E es mayor en la probeta 3 y menor en la probeta 1.

Tabla 4.2: Resultados de pruebas mecánicas muestra 2.

]MUESTRA 2			
	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3
σ_{II} (MPa)	0.11594	0.10738	0.1094
ε_{II}	5.63E-04	5.18E-04	9.86E-04
σ_F (MPa)	0.24188	0.41006	0.24188
ε_F	0.08784	0.3831	0.21322
σ_T (MPa)	2.23063	7.16688	7.37619
ε_T	0.02991	0.09046	0.04643
α_2 (MPa)	-8527.28 ± 665.9	-2229.64 ± 9.595	-6003.16 ± 61.64
α_0 (MPa)	0.0187807 ± 0.00456	0.0580881 ± 0.003889	-0.115373 ± 0.006602
α_3 (MPa)	112836 ± 5.691e+04	8297.63 ± 69.79	45921.4 ± 872.6
α_4 (MPa)	1.55493e+06 ± 2.107e+06		
α_5 (MPa)	-3.36698e+07 ± 2.812e+07		
E (MPa)	214.367 ± 3.165	213.292 ± 0.3729	342.917 ± 1.23

Realizado por: Altamirano, 2022.

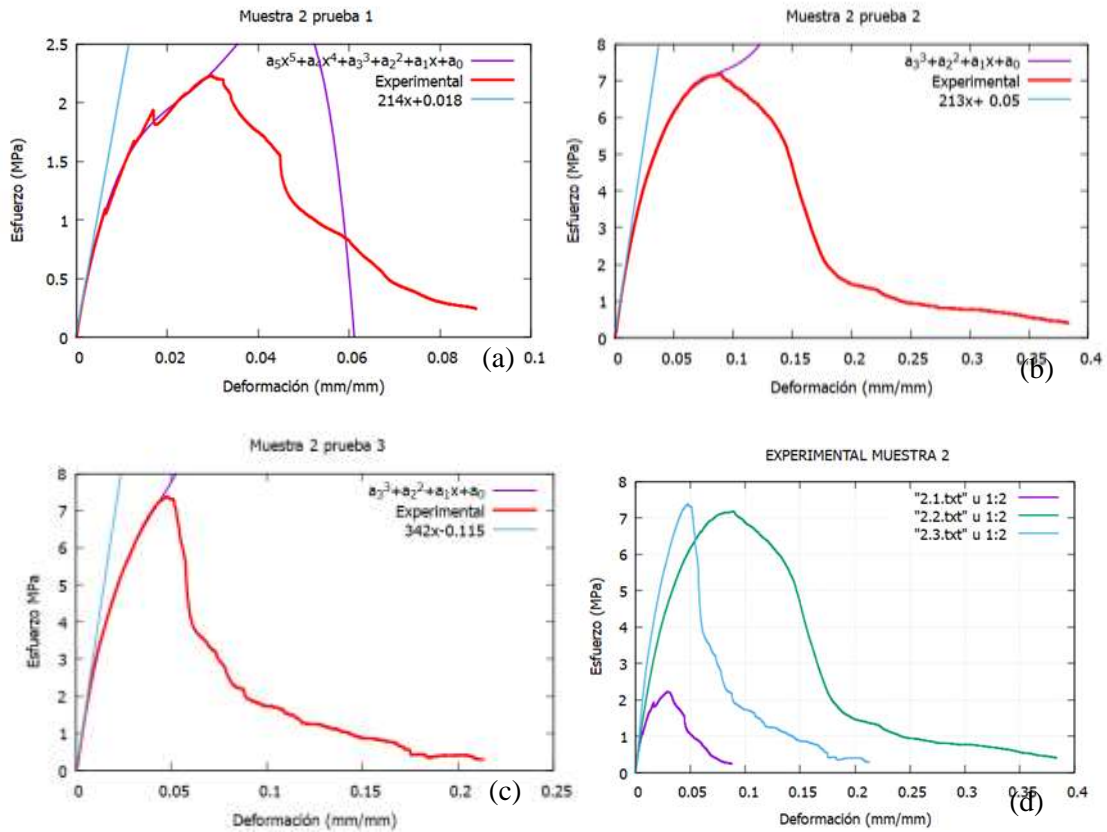


Gráfico 4.3: Curvas esfuerzo-deformación, muestra 2.

Realizado por: Altamirano, 2022.

En la Tabla 4.2 y Gráfico 4.3 se muestran los resultados para la muestra 2. En este caso, las probetas que tiene mayor esfuerzo de tracción son la probeta 3 y 2, con una diferencia porcentual del 2.9%, y el de la probeta 1 fue mucho menor. La deformación de ruptura fue mayor para la probeta 2 (que tiene un menor esfuerzo de tracción) seguido por la probeta 3. Los módulos E son similares para las probetas 1 y 2 (214.4 y 213.3 MPa, respectivamente) y menores que el de la probeta 3 (342.9 MPa).

Tabla 4.3: Resultados de pruebas mecánicas muestra 3.

MUESTRA 3			
	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3
σ_U (MPa)	0.11463	0.1275	0.11063
ε_U	6.94E-04	1.17E-03	1.03E-03
σ_F (MPa)	0.12113	0.01288	0.18288
ε_F	0.25697	0.2717	0.61817
σ_T (MPa)	9.29938	5.87875	9.44188
ε_T	0.03855	0.04225	0.05487
α_1 (MPa)	-3002.45 ± 20.12	-2668.92 ± 13.0	-1865.5 ± 11.73
α_2 (MPa)	-0.205449 ± 0.006655	-0.150507 ± 0.005263	-0.234913 ± 0.007899

E (MPa)	365.394 ± 0.798	257.278 ± 0.5719	280.677 ± 0.6637
---------	---------------------	----------------------	----------------------

Realizado por: Altamirano, 2022.

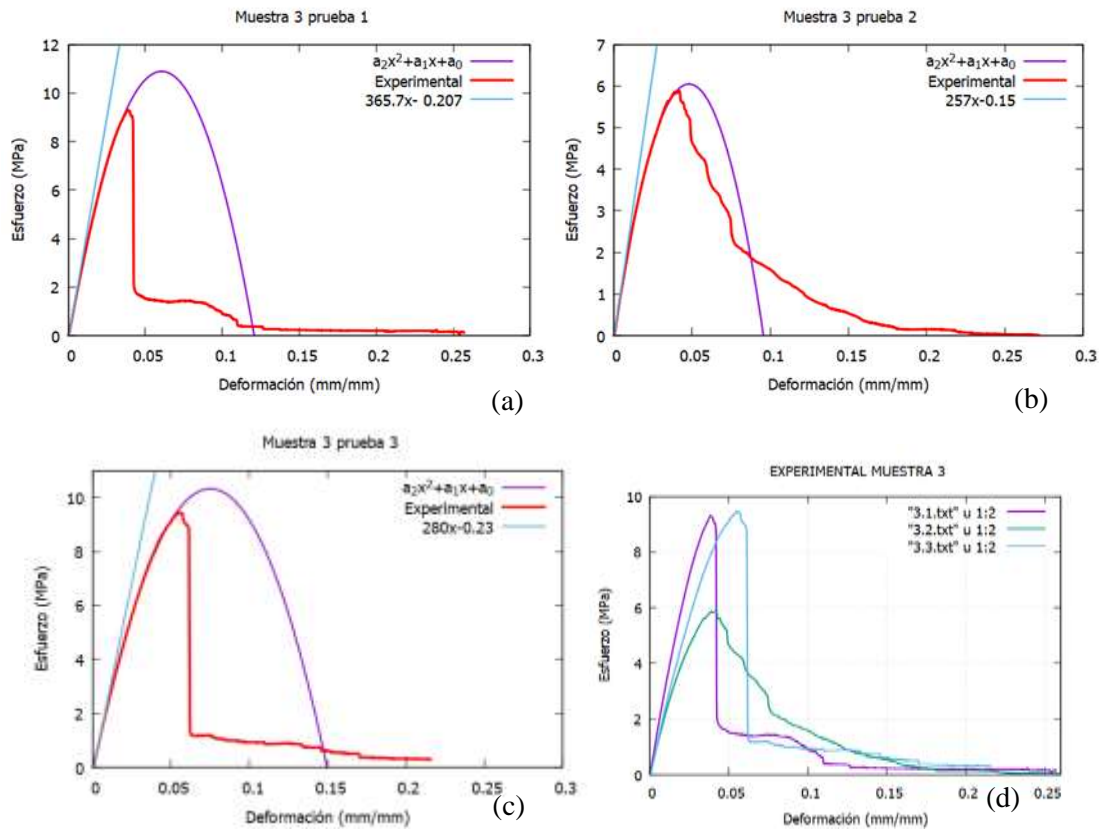


Gráfico 4.4: Curvas esfuerzo-deformación, muestra 3.

Realizado por: Altamirano, 2022.

En la Tabla 4.3 y Gráfico 4.4 se muestran los resultados de la muestra 3. Las probetas con mayor esfuerzo de tracción son la 3 y la 1 (1.5% de diferencia), y el de mayor esfuerzo de fractura es la probeta 3. La probeta 1 tiene el mayor módulo E, seguido por el de la probeta 3.

Tabla 4.4 :Resultados de pruebas mecánicas muestra 4.

MUESTRA 4			
	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3
σ_U (MPa)	0.114	0.09523	0.10648
ϵ_U	5.50E-04	4.22E-04	3.95E-04
σ_F (MPa)	0.34956	0.34956	0.02573
ϵ_F	0.11388	0.11388	0.05039
σ_T (MPa)	2.92063	4.80469	5.32917
ϵ_T	0.02193	0.02855	0.02265
α_2 (MPa)	-2790.3 ± 49.59	269.746 ± 674.6	-16126.1 ± 156.8
α_0 (MPa)	-0.0151795 ± 0.001153	-0.0449574 ± 0.009481	0.0413073 ± 0.003945

a_3 (MPa)	-91050.6 ± 1495	$-298412 \pm 3.57e+04$	128734 ± 4563
a_4 (MPa)		$5.21348e+06 \pm 6.223e+05$	
E (MPa)	236.923 ± 0.4631	286.311 ± 4.686	532.41 ± 1.521

Realizado por: Altamirano, 2022.

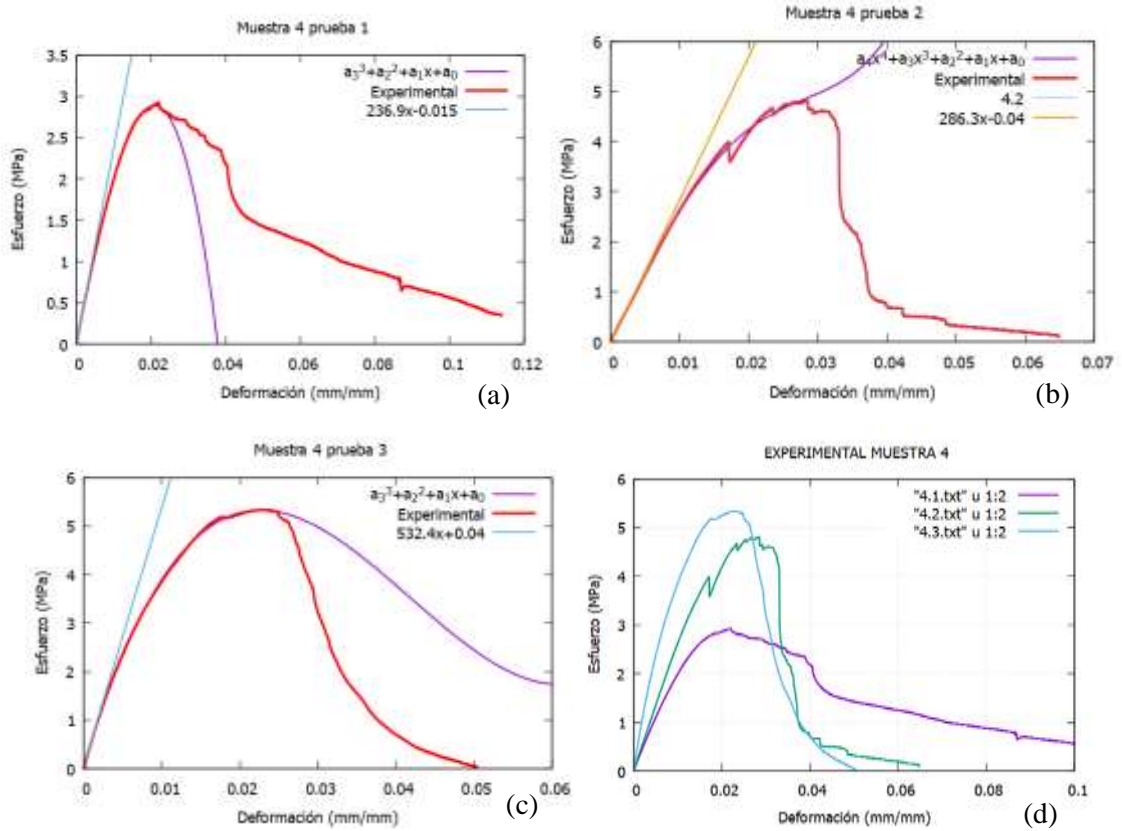


Gráfico 4.5: Curvas esfuerzo-deformación, muestra 4.

Realizado por: Altamirano, 2022.

En la Tabla 4.4 y Gráfico 4.5 se dan los resultados de la muestra 4. Se observa que la probeta 3 tiene mayor esfuerzo de tracción, mayor módulo de E, pero menor deformación de fractura.

Tabla 4.5: Resultados de pruebas mecánicas muestra 5.

MUESTRA 5			
	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3
σ_{II} (MPa)	0.11506	0.11788	0.11963
ε_{II}	2.69E+00	3.58E-04	2.71E-04
σ_F (MPa)	0.86331	0.11294	1.445
ε_F	0.0721	0.04472	0.77895
σ_T (MPa)	7.32688	7.97688	8.45688
ε_T	0.04357	0.03823	0.04185
a_2 (MPa)	-14357.5 ± 105.6	-6003.52 ± 185.4	-9097.29 ± 138.6
a_0 (MPa)	-0.0643563 ± 0.0035	-0.134307 ± 0.004679	-0.0658267 ± 0.002053
a_3 (MPa)	248737 ± 3653	-214785 ± 7331	-392956 ± 8106
a_4 (MPa)	$-2.0856e+06 \pm 4.168e+04$	$4.58811e+06 \pm 9.547e+04$	$1.80971e+07 \pm 2.057e+05$

α_5 (MPa)			-1.93913e+08 \pm 1.883e+06
E (MPa)	494.612 \pm 1.124	502.158 \pm 1.724	539.448 \pm 0.966

Realizado por: Altamirano, 2022.

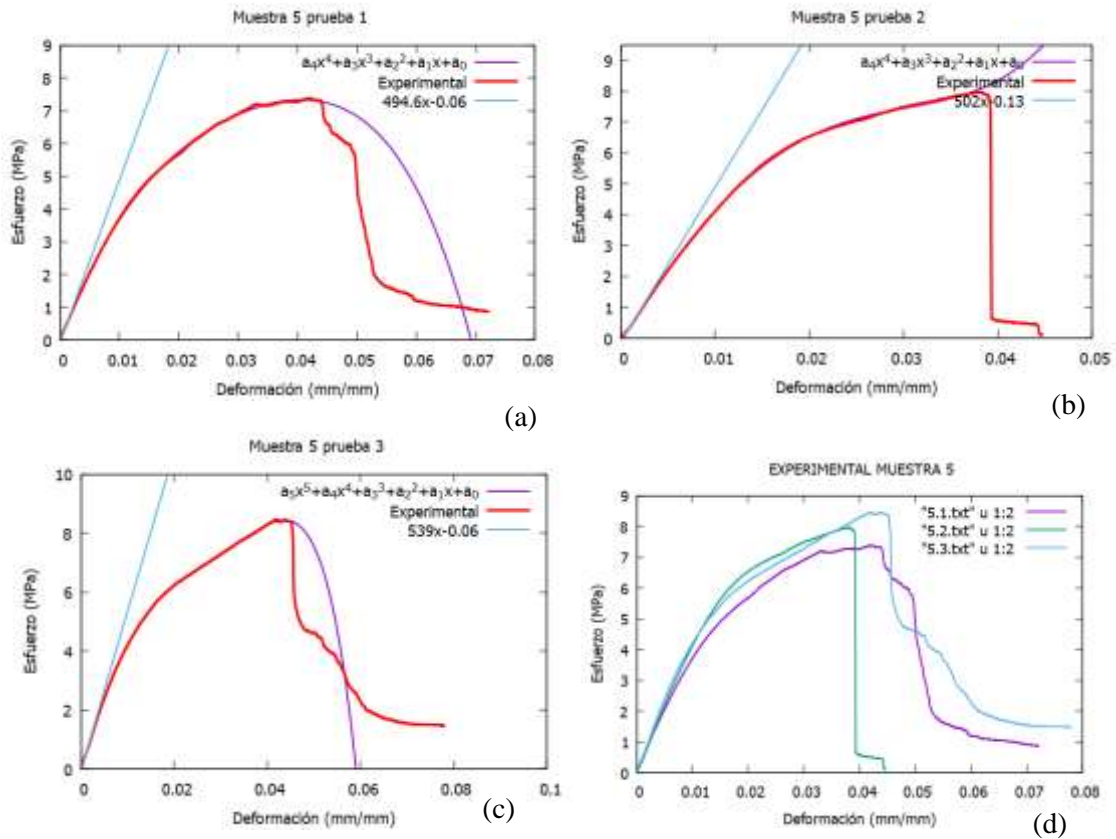


Gráfico 4.6: Curvas esfuerzo-deformación, muestra 5.

Realizado por: Altamirano, 2022.

Finalmente, en la Tabla 4.5 y Gráfico 4.6 están los resultados para la muestra 5. La probeta 3 tiene mayor esfuerzo de tracción, mayor deformación de fractura y mayor módulo de elasticidad.

Debido a que al comparar las curvas de las probetas unidas en los Gráficos 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 literal (d) son bastante distintas, no se puede realizar una medida media para obtener el comportamiento global de cada muestra. Estas diferencias entre cada probeta, dentro de las mismas muestras, se deben a varios factores: primero las fibras no se dispersaron de manera homogénea ni constante, (ya que la dispersión fue manual) y esto produjo que se aglomeren las fibras en diferentes partes de la muestra; y el otro factor es la no homogeneidad del sistema de calentamiento que se construyó, ya que en ciertas zonas de las placas de acero la resistencia calentaba demasiado y en otras no, por lo que al terminar el proceso de curado de las muestras se observaba que ciertas partes del material estaban más bronceadas que otras.

Para demostrar la reproducibilidad de los resultados se debería realizar una vez más las mismas

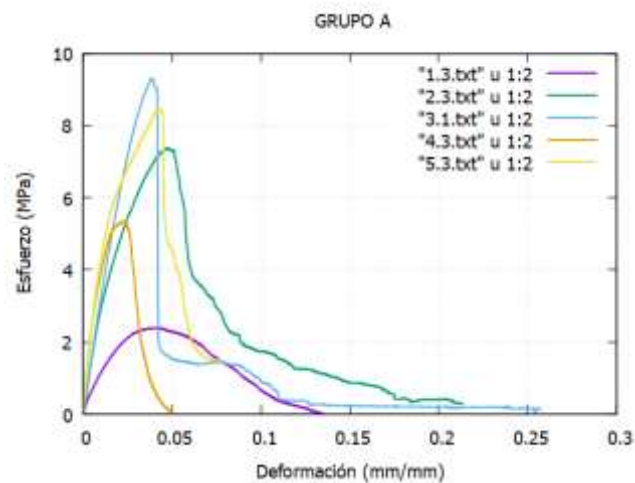
muestras. En este trabajo no se pudieron realizar ya que el tiempo de entrega de resultados es limitado, y también debido a que no se tenía suficiente presupuesto para procesar otras muestras.

Para realizar un análisis estadístico, se separó en 3 Grupos de acuerdo a los valores; máximo (Grupo A), intermedio (Grupo B) y mínimo (Grupo C) del módulo elástico E (Tabla 4.6).

Tabla 4.6: Comparación de resultados de módulos de elasticidad.

Comparación de resultados					
GRUPO A		GRUPO B		GRUPO C	
	MÓDULO E (MPa)		MÓDULO E (MPa)		MÓDULO E (MPa)
M1.1	123.216	M1.3	45.5601	M1.2	40.6838
M2.2	342.917	M2.3	214.367	M2.1	213.292
M3.2	365.394	M3.1	280.677	M3.3	257.278
M4.1	532.41	M4.3	286.311	M4.2	236.923
M5.1	539.448	M5.3	502.158	M5.2	494.612
MÁXIMO	M5.1		M5.3		M 5.2
MÍNIMO	M1.1		M1.3		M1.2

Realizado por: Altamirano, 2022.



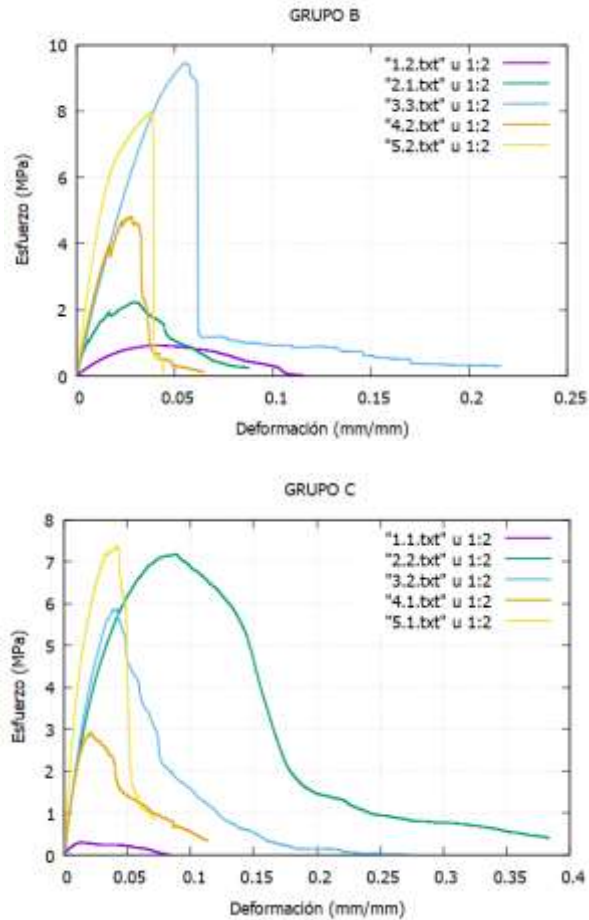


Gráfico 4.7: Comparación de curvas de cada muestra.

Realizado por: Altamirano, 2022.

En el Gráfico 4.7 se puede observar las diferentes comparaciones de las curvas, según la Tabla 4.6. Se tiene que la muestra que tuvo el mayor módulo de elasticidad es la muestra 5 en cada una de sus probetas al ser comparada con el resto de muestras estos resultados, y la muestra que tuvo menor módulo de elasticidad en cada una de sus probetas, fue la muestra 1. Por lo que concluimos que el tipo de TPS utilizado, la cantidad de presión, disposición de las fibras influyen en las características de elasticidad de este material.

4.2 Caracterización morfológica

En el laboratorio de óptica del edificio de investigación de la Facultad de Ciencias se utilizó el microscopio de resolución 10K para caracterizar la morfología de cada muestra. En los Gráficos 4.8 a la 4.12 se pueden observar las imágenes superficiales de cada muestra.

4.2.1 Microscopio óptico

(a)

(b)

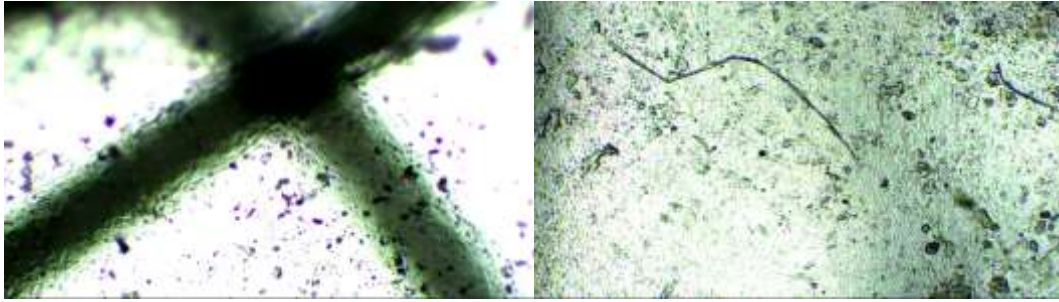


Gráfico 4.8: Captura de imagen en microscopio óptico muestra 1.

Realizado por: Altamirano, 2022.

En este microscopio la muestra 1 (a) fue difícil de capturar su morfología ya que es la cara que están dispuestas las fibras. La mayoría de las fibras estaban fuera del polímero. Este gráfico muestra como ciertas fibras si están dentro del material. El Gráfico 4.8b muestra que la superficie en que no están dispuestas las fibras, es una superficie bastante homogénea casi lisa ambas imágenes fueron tomadas con resolución 4k.

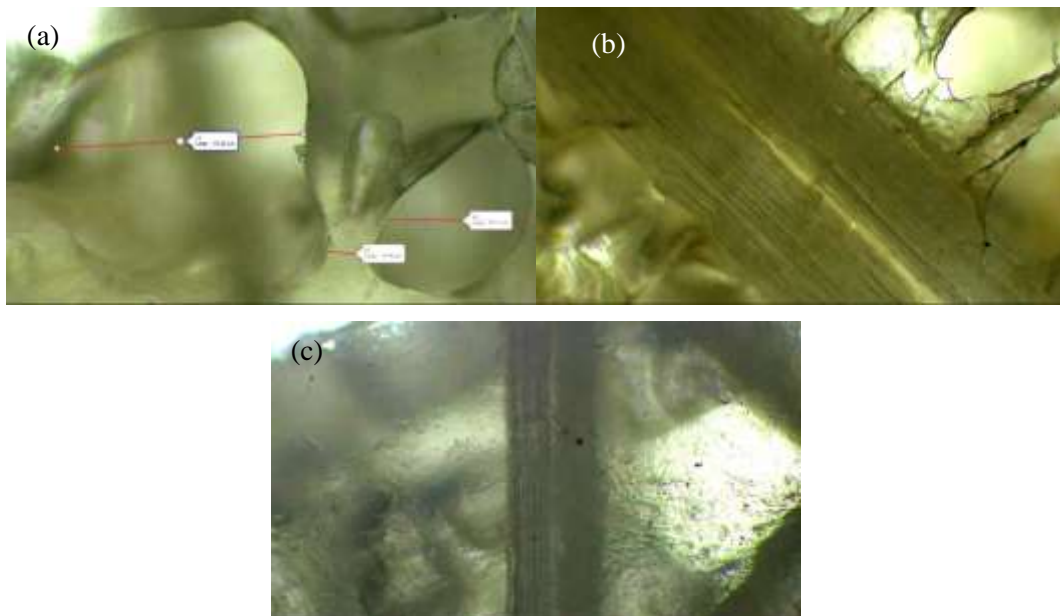


Gráfico 4.9: Captura de imagen en microscopio óptico muestra 2.

Realizado por: Altamirano, 2022.

La muestra 2 (Gráfico 4.9) tenía dispuestas las fibras arriba y abajo, por lo que solo se tomó las imágenes de un solo lado. En el Gráfico 4.9a vemos la porosidad y las burbujas de aire que se forman en la superficie. En el Gráfico 4.9b nos adentramos dentro de uno de los poros y se puede observar como las fibras se adhieren al polímero. En el Gráfico 4.9c podemos ver una de las partes del material que no es porosa y es lisa; ya que el material es transparente se puede observar las fibras dentro del polímero.

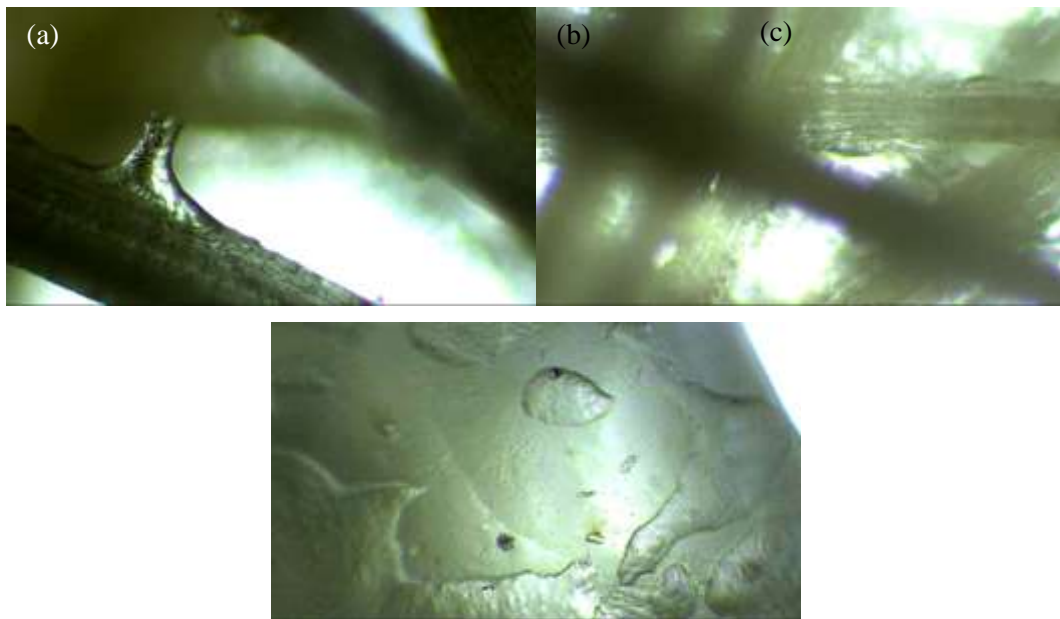


Gráfico 4.10: Captura de imagen en microscopio óptico muestra 3.

Realizado por: Altamirano, 2022.

En el Gráfico 4.10 se presenta las imágenes de la muestra 3. En este gráfico se puede observar claramente cómo se une el polímero con la fibra. En el Gráfico 4.10b vemos que muchas fibras no se adentraron al material y permanecieron fuera de este, sin embargo tienen polímero a sus alrededores. En el Gráfico 4.10c se ve las burbujas bastante grandes de entre 100 y 900 μm



Gráfico 4.11: Captura de imagen en microscopio óptico muestra 4.

Realizado por: Altamirano, 2022.

El Gráfico 4.11 son imágenes de la muestra 4 y exhibe como mejoró el material en cuanto a la adherencia fibra-polímero. Existen ciertos poros en la superficie del material entre 50 y 100 μm .

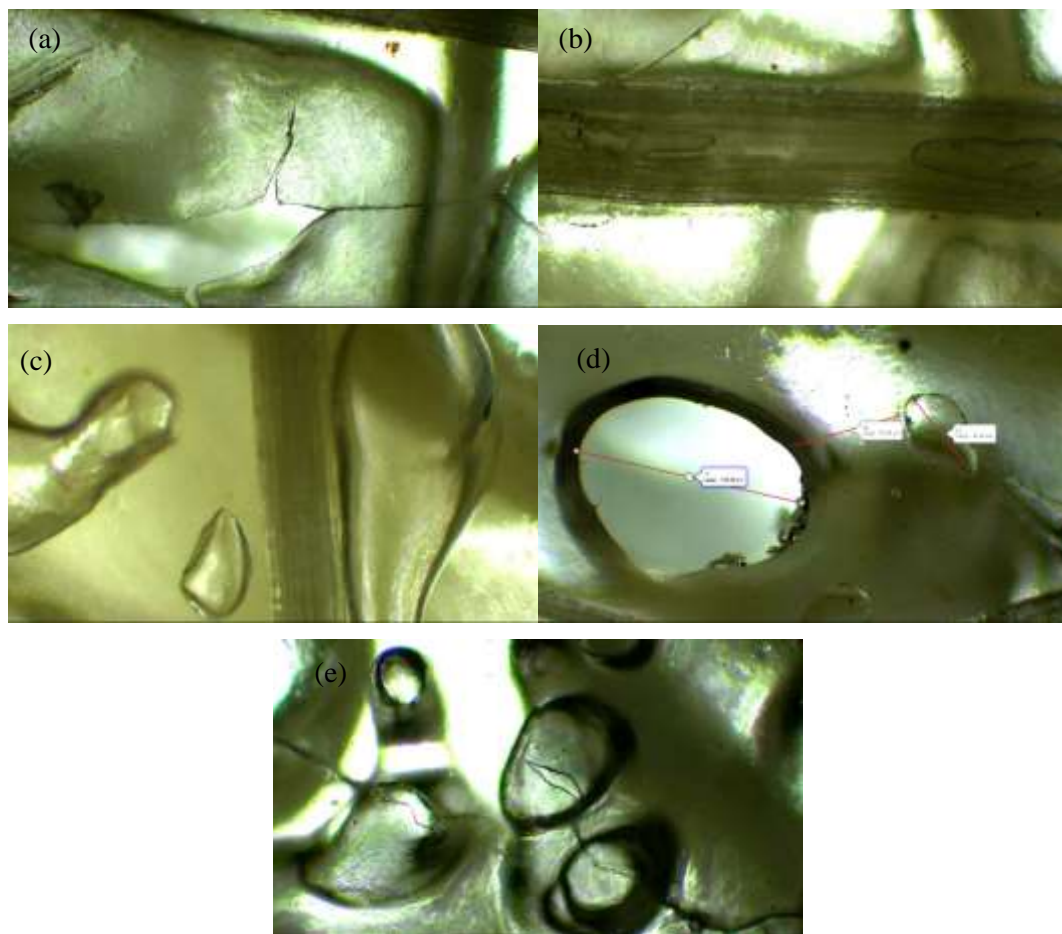


Gráfico 4.12: Captura de imagen en microscopio óptico muestra 5.

Realizado por: Altamirano, 2022.

La muestra 5, observada en el Gráfico 4.12, es la que mostró más porosidad, resquebrajamiento y burbujas de aire en su superficie. Sin embargo, es la que no tiene fibras sin adherirse al polímero, todas las fibras están dentro del material.

4.2.2 SEM Muestra 1

Ya que el costo que representa para la Universidad el caracterizar en el microscopio electrónico de barrido, debido a que se deben metalizar las muestras que no son conductoras de electricidad, se realizó una comparación solamente de dos muestras, la muestra 1 que tiene la mínima elasticidad, y de la muestra 5 que es la que tiene máxima elasticidad.

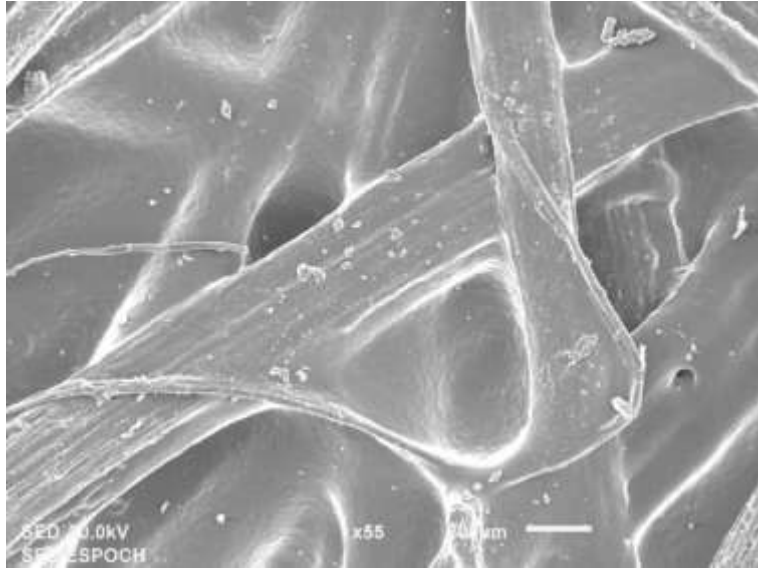


Gráfico 4.13: Superficie muestra 1 voltaje 20kV, resolución 200 μ m.

Realizado por: Altamirano, 2022.

En el Gráfico 4.13 se observa una superficie no uniforme de la muestra 1, donde podemos ver que es una superficie sin resquebrajamientos. En esta parte de la muestra se encontró un poro de 50 μ m. En esta parte del material la mayoría de las fibras están adheridas al polímero.

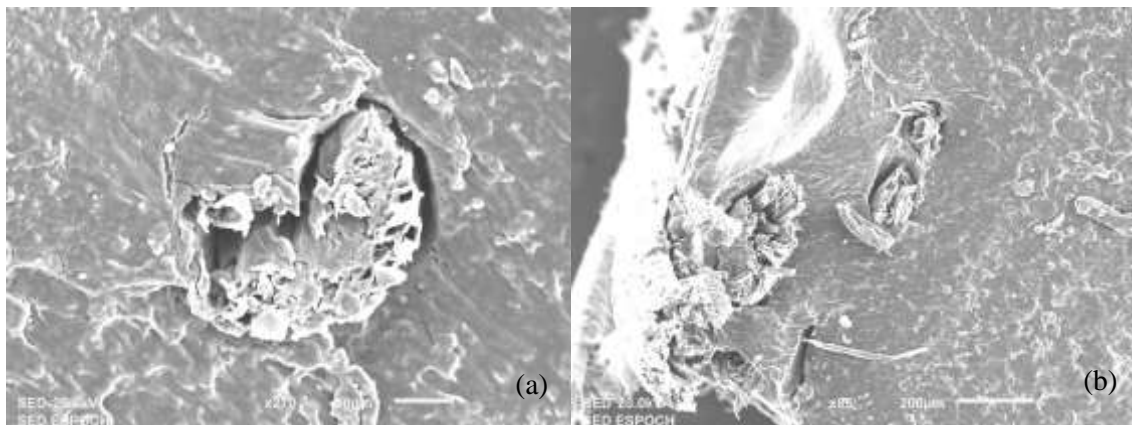


Gráfico 4.14: Superficie de corte transversal muestra 1 voltaje 20kV, (a) resolución 50 μ m (b) resolución 200 μ m.

Realizado por: Altamirano, 2022.

En el Gráfico 4.14 se observa un corte transversal de la muestra 1. Se puede evidenciar qué sucede dentro del material. Se puede ver la superficie de fractura bastante lisa junto con las fibras. Dentro del polímero no hay porosidades evidentes y existe una buena adherencia entre el polímero y las fibras, ya que al momento de romper el material estas no fueron arrancadas, sino que se rompieron junto con el material.

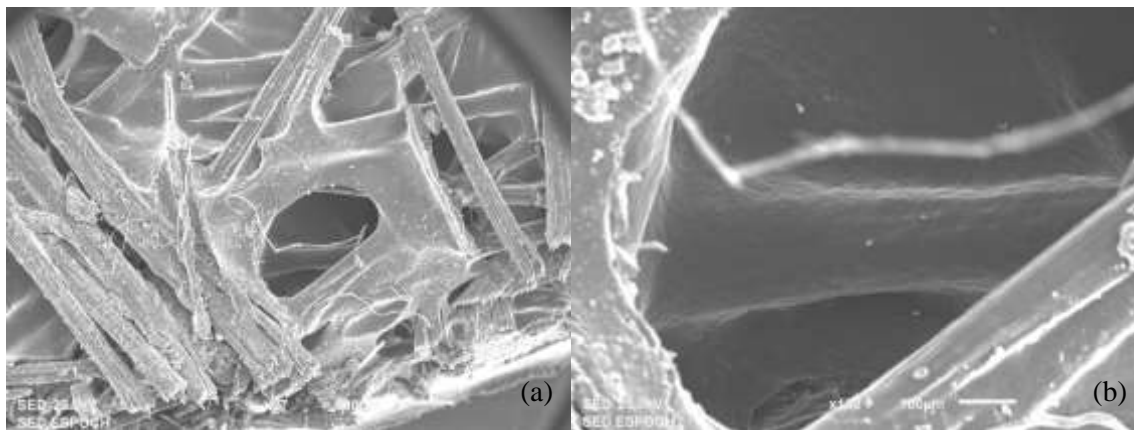


Gráfico 4.15: Adherencia de fibras al polímero muestra 1.

Realizado por: Altamirano, 2022.

En el Gráfico 4.15a (muestra 1) se puede ver una parte del material donde las diferentes fibras están encima del polímero y no se han adherido a la matriz. Se puede también visualizar un poro de aproximadamente 500 μm . Podemos adentrarnos a este poro ya que el polímero es transparente (Gráfico 4.15b) y podemos visualizar como la fibra logra adherirse al polímero.

4.2.3 SEM Muestra 5

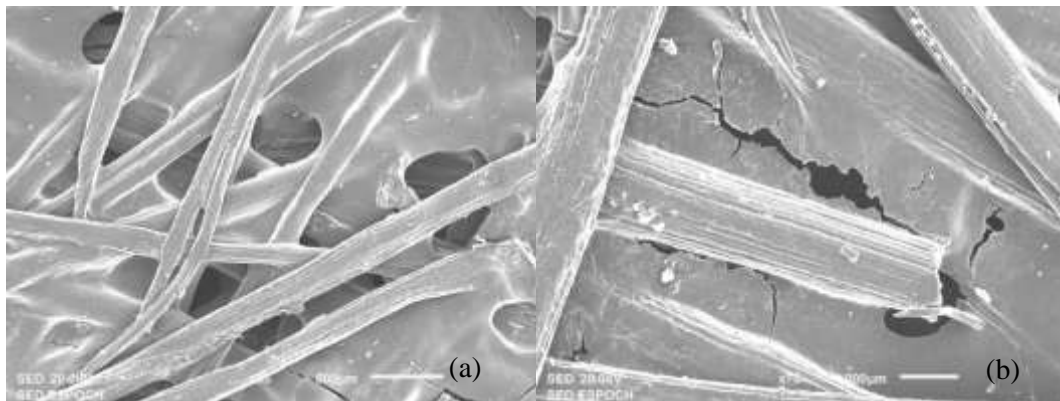


Gráfico 4.16 Superficie muestra 5 voltaje 20kV, (a) resolución 500 μm , (b) resolución 200 μm .

Realizado por: Altamirano, 2022.

En el Gráfico 4.16 se puede observar una superficie no uniforme de la muestra 5, una superficie con varios resquebrajamientos alrededor de todo el material. Se podía encontrar las mismas características, con bastantes porosidades de alrededor de 200 μm a 500 μm de diámetro, a diferencia de la muestra 1. Superficialmente la mayoría de las fibras están adheridas al material.

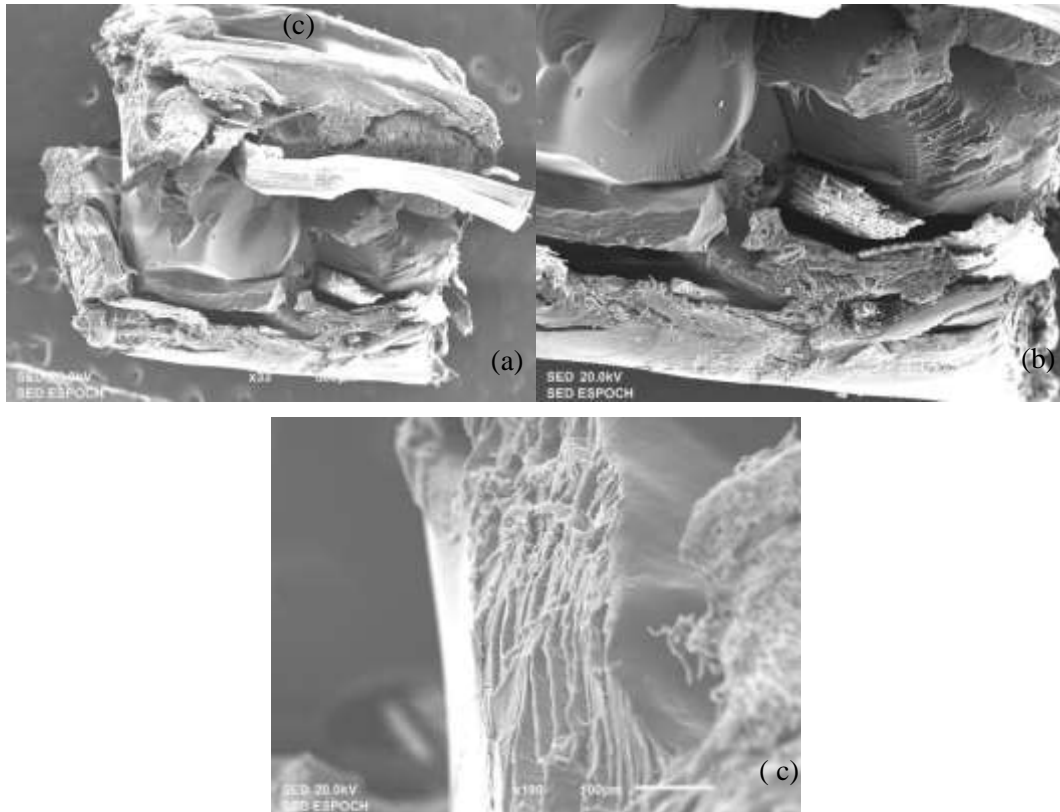


Gráfico 4.17: Superficie de corte transversal de la muestra 5 con voltaje 20kV. (a) Resolución 500µm, (b) resolución 200µm y (c) resolución 100µm.








Realizado por: Altamirano, 2022.






En el Gráfico 4.17 se presenta un corte transversal de la muestra 5. Se puede ver la superficie de fractura bastante resquebrajada y no homogénea, junto con las fibras (a, b). Hay porosidades evidentes que simulan ser múltiples superficies lisas, el material no es liso en su plano total (b), y existe una buena adherencia entre el polímero y las fibras.

4.3 Caracterización térmica

En el edificio de investigación se utilizaron los laboratorios de electromagnetismo y de investigación para montar un experimento de temperatura de fusión y ebullición, y para uso de la mufla la cual permite visualizar la degradación del material a medida que la temperatura aumenta. Para realizar una buena caracterización cualitativa de las muestras, cuando estas se degradan térmicamente, se esperó 10 minutos para abrir la mufla al cambiar cada una de las temperaturas; en total se utilizó aproximadamente 4 horas para hacer el análisis por cada muestra.

Tabla 4.7: Apariencia degradación térmica.

Gráficas según características de degradación		
1	Normal	
2	Amarillenta	
3	café	
4	café, con humo (libera componentes químicos)	-----
5	café, más humo	-----
6	Negro, mucho humo	
7	se esponjó (humo)	
8	menos humo	-----
9	no humo	-----
M	mismo	-----
M	mismo	-----
M	mismo	-----
10	se compacta	
11	más compacto	

			
12	comienza a quemarse		
			
13	1/4 blanco		
M	mismo	-----	
			
14	1/2 blanco		
M	mismo	-----	
			
15	3/4 blanco y degrada		
			
16	Todo blanco		
M	mismo	-----	

Realizado por: Altamirano, 2022.

Tabla 4.8: Características de degradación térmica de cada muestra

APARIENCIA EN DEGRADACIÓN TÉRMICA					
Temperatura	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
200-225	1	2	2	2	2
220-245	2	3	3	3	3
240-265	3	5	5	5	5
260-285	4	6	6	6	6
280-305	5	7	7	7	7
300-325	6	8	8	8	8
320-345	7	9	9	9	9
340-365	8	M	M	M	M
360-385	9	M	M	M	M
380-405	M	M	M	M	M
400-425	M	10	10	10	10
420-445	M	11	11	11	11
440-465	10	12	12	12	12
460-485	11	13	13	13	13
480-505	12	M	M	M	M
500-525	13	14	14	14	14
520-545	M	M	M	M	M

540-465	14	15	15	15	15
560-585	M	16	16	16	16
580-605	15	M	M	M	M
600-620	16	M	M	M	M
620-700	M	M	M	M	M

Realizado por: Altamirano ,2022.

En la Tabla 4.7 se muestra las imágenes que sucedieron en cada proceso, cada número representa la diferente degradación. En la Tabla 4.8 se presenta un análisis de cada muestra, utilizando la misma numeración dada en la Tabla 4.7, se observa que la única muestra que tuvo diferente degradación fue la muestra 1, la cual tuvo un proceso más lento. Un ejemplo de esto, mientras las muestras 2, 3, 4 y 5 ya comenzaban a quemarse y hacerse blancas a los $440^{\circ}C$, la muestra 1 lo hizo a los $480^{\circ}C$. Esto se debe a que el termoplástico utilizado en la muestra 1 es diferente al TPS utilizado en el resto de las muestras.

CONCLUSIONES

- Las propiedades mecánicas, estructurales y térmicas del biocompuesto plástico a base de almidón de yuca y fibra de cabuya, procesado mediante moldeo por compresión, se caracterizaron a partir de diferentes pruebas como la de tensión por tracción, análisis morfológico y análisis cualitativo térmico.
- Utilizando una concentración de 0.1% m/v de permanganato de potasio y 5% m/v de ácido oxálico, se mejoró la adherencia entre la matriz polimérica y la fibra de cabuya, ya que el permanganato de potasio actúa como agente oxidante cuando este entra en contacto con un ácido y esto provoca cambios químicos en la superficie. Sin embargo, en el análisis morfológico mediante microscopía electrónica de barrido se pudo observar que aún no existe una adherencia perfecta fibra-matriz ya que existen huecos a su alrededor.
- Mediante la técnica de moldeo por termo-compresión y utilizando una máquina hidráulica, a la cual se le acopló una máquina de calor (fabricada en este trabajo) con capacidad de hasta 8MPa y 300°C, se logró fabricar un compuesto de matriz polimérica. Se elaboraron 5 muestras compuestas de almidón termoplástico de almidón de yuca con fibras de cabuya, variando ciertos parámetros durante el proceso: cantidad de agua/TPS, presión, cantidad de plastificante y disposición de fibras.
- Se realizó las caracterizaciones requeridas: tensión por tracción en una máquina universal, donde el módulo de elasticidad es el parámetro de rigidez de la región elástica del material, éste se obtuvo mediante una aproximación polinomial de las curvas experimentales hasta el valor máximo del esfuerzo. Además se realizó el análisis de superficie del polímero con un microscopio electrónico de barrido (solo la muestra 1 con el menor módulo de elasticidad, y la muestra 5 con el mayor módulo de elasticidad) y con un microscopio óptico (todas las muestras); finalmente se hizo un análisis cualitativo térmico con una mufla.
- Como parte de las pruebas mecánicas se obtuvieron curvas de deformación vs esfuerzo de cada probeta, las cuales fueron diferentes dentro de cada muestra. Esto se debe a que estas no son homogéneas en toda su superficie, ya que el gradiente de temperatura de la máquina de calor era inestable. Sin embargo, al hacer el análisis del módulo de elasticidad, este resultó ser diferente entre cada muestra, de donde se concluye que podemos manipular las propiedades mecánicas

controlando las variables del proceso. La muestra 1 fue la que menor módulo de elasticidad tuvo (40-123MPa) debido que, a diferencia de las demás muestras, en esta se utilizó más cantidad de plastificante (50%), en cambio la muestra 5 fue la que mejor módulo de elasticidad tuvo (494-539MPa) ya que su presión fue mayor (4MPa), la disposición de fibras fue tipo ABC, y su cantidad de plastificante fue menor (33.3%).

- Mediante un análisis morfológico, a través de microscopio óptico y microscopio electrónico de barrido, se observó que la muestra 1 no tuvo poros ni fracturas en su superficie o en su corte transversal, a diferencia de la muestra 5 que fue la que mayor porosidad, rugosidad y fracturas presentaba (defectos lineales y volumétricos). Con esta caracterización se pudo explicar que la muestra 5 tuvo el mayor módulo de elasticidad, ya que al estirar el material este tiene defectos iniciales, entonces resiste más ya que está en su estado natural, a diferencia de las demás muestras que eran menos porosas. Por otra parte, el análisis cualitativo térmico determinó que todas las muestras tienen una eficiencia térmica sin degradación a los $200^{\circ}C$, la muestra 1 resultó ser la única que se degradaba más lentamente, esto se debe a que fue la única en la que se utilizó más cantidad de plastificante.

RECOMENDACIONES

- Para buscar una mejor adherencia entre fibra y polímero se podría agregar en la superficie, durante el proceso de moldeo, un agente adherente como el anhídrido maleico. (Alboleda, G, et al, 2016, p.1-3)
- Cortar las fibras más pequeñas entre 1mm y 5mm y mezclarlas junto con el almidón y plastificante con velocidad de giro constante, para poder tener mejor homogeneidad de disposición de fibras en el material.
- Como se mencionó en el texto, debido al tiempo y costos no se realizaron suficientes muestras para una estadística correcta, por lo tanto, se recomienda realizar varias repeticiones para comprobar de una mejor manera la reproducibilidad de los resultados experimentales.
- Si desea cortar las probetas mediante corte laser, hay que esperar para cada corte alrededor de 30 minutos para que la máquina se enfríe y no quemé las muestras, de este modo no se perderá el material de caracterización.
- Mejorar el gradiente de temperatura de la máquina de calor para tener homogeneidad en las muestras.

GLOSARIO

Plástico: Un material sintético específico que es fácil de moldear y está compuesto principalmente de polímeros. (Diccionario RAE)

Tracción; Esfuerzo a que está sometido un cuerpo por la acción de dos fuerzas opuestas que tienden a alargarlo. (Diccionario RAE)

Viscosidad; Las propiedades de los líquidos describen su resistencia al flujo causada por la fricción entre las moléculas. (Diccionario RAE)

Porosidad: Espacio que hay entre las partículas de los sólidos de estructura discontinua (Diccionario RAE).

Módulo de elasticidad: (E) de un objeto se define como la pendiente de la curva tensión-deformación en la región de deformación elástica, donde se cumple la ley de Hooke (Wikipedia, 2022).

Degradación térmica; es un proceso térmico de descomposición de la cadena del polímero, rompiendo los enlaces entre las moléculas de estas cadenas convirtiéndolas en monómeros. (Wikipedia, 2022).

Morfoogía: rama de una disciplina que se ocupa del estudio y la descripción de las formas externas de un objeto. (Diccionario SIGNIFICADOS, Fabián Coelho)

Biodegradable: Dicho de una sustancia: Que puede ser degradada por acción biológica. (Diccionario RAE)

Esfuerzo: Consecuencia de las fuerzas internas producidas en un cuerpo que recibe aplicación de cargas exteriores. (Rayas, J, et al, 2003, p.556)

Deformación: cambio de longitud que sufre un objeto bajo esfuerzo. (Rayas, J, et al, 2003, p.556)

BIBLIOGRAFÍA

VALERO, V; & ORTEGÓN, Y; & USCATEGUI, Y. "Biopolímeros: Avances Y Perspectivas", *Universidad de La Sabana*, (2013), (Colombia) pp.1-8.

LIBERA, "Impacto Del Abandono Del Plástico", *SEObirdlife* [en línea], 2015. Disponible en: <https://theecologist.net/impacto-del-abandono-del-plastico-en-la-naturaleza-un-desastre-anunciado/>

KASA, S; & YAO, L; & BHADA, P; & VAN, F, "What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050", *Desarrollo urbano; Washington, DC: Banco Mundial* [en línea], 2018, (Estados unidos). Disponible en: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317> Licencia: CC BY 3.0 IGO

RUHUL A; & MAHMUD A; & ANNAYA F, "Natural Fiber Reinforced Starch Based Biocomposites", *Polymer Science, Series A 61, 5*, (2019), pp. 533--543.

BRENES A ; & BENITO A, "Comparative study of the mechanical properties of polyester resin with and without reinforcement with fiber-glass and furraquea cabuya fibers", *Fibers and Polymers 15, 10*, (2014), pp. 2186--2192.

SARAVANAN C, "Efecto de los parámetros del proceso sobre la resistencia al impacto del tablero compuesto de polipropileno reforzado con fibra corta de yute", *IJFTR 20, 2*, (2013), pp. 207--223.

RUA, J.; & BUCHELY, M; & MONTEIRO, S; & COLORADO, H, "Structure–Property Relation of Epoxy Resin with Figue Fibers: Dynamic Behavior Using Split-Hopkinson Pressure Bar and Charpy Tests", In: *Ikhmayies, Li, J., Vieira, C., Margem (Deceased), J., de Oliveira Braga, F. (eds) Green Materials Engineering. The Minerals, Metals & Materials Series. Springer*, Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-030-10383-5_5 (2019).

SRINIVASA, C, "Static bending and impact behaviour of areca fibers composites", *Materials Design 32, 4*, (2011), pp. 2469--2475.

TEMESGEN. B, "Study on effect of process parameters on tensile properties of compression molded natural fiber reinforced polymer composites", *Applied Sciences 2, 3*, (2020).

TORRES, F; & ARROLLO, O; & GÓMEZ, C, "Processing and Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Thermoplastic Starch Biocomposites", *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, (2007)

LUNA, G, "Almidón termoplástico de yuca reforzado con fibra de fique", *DYNA 76*, (2009), pp. 145 - 151.

MINA, J, "Caracterización físico-mecánica de un almidón termoplástico (tps) de yuca y análisis interfacial con fibras de fique", *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, (2012), pp. 99-109.

GIRONÉS, J; & LÓPEZ, J; & MUTJÉ, P, "Natural fiber-reinforced thermoplastic starch

composites obtained by melt processing", *Composites Science and Technology* 72, 7, (2012), pp. 858--863.

HERMIDA, É, "Polímeros, Guía didáctica". *Capítulo 9*, (2011).

SPERLING, L, "Introduction to physical polymer science", *John Wiley & Sons* (2005).

BRADY, J, "Polymer properties and characterization", in *Developing Solid Oral Dosage Forms*, 2017, pp. 181-223.

LÓPEZ, F, "Fundamentos de polímeros", *Escuela Venezolana para la enseñanza de la Química*. 2004, (Mérida), pp. 49-51.

GONZALEZ, A, et al., "Almidón Nativo y Modificado. Obtención, cuantificación, modificación y usos", *Universidad Autonoma Gabriel Rene Moreno*, 2014, (Bolivia).

AGREDA, V; & WALTER, E "Mejoramiento de las propiedades Microestructurales, Físicas y Mecánicas de Matrices Poliméricas", *Universidad Nacional de Trujillo*, 2018, (Perú.).

KHAN, J; & KHAN, M; & ISLAM, R "Mechanical, thermal and degradation properties of jute fabric - reinforced polypropylene composites: Effect of potassium permanganate as oxidizing agent" *Polymer Composites* 34, 5 (2013), pp. 671-680.

AYALA, J; & BARBOSA, C, "Determinación de la resistencia a la tracción y tenacidad de un material compuesto a partir de bagazo de caña de azúcar y almidón de yuca a través de los ensayos de tensión de impacto Charpy" (Trabajo de titulación). (pregrado) *Universidad Santo Tomás*, 2015,(Colombia), pp.1-97. Disponible en:

<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2669/ayalajorge2014.pdf?se>

MAJEWSKI, T; & BŁĘDZKI, A, "Desarrollo y aplicaciones actuales de los plásticos reforzados por fibras naturales" *Universidad de las Américas* (2013), pp.1-7. Disponible en: <https://docplayer.es/18312970-Desarrollo-y-aplicaciones-actuales-de-los-plasticos-reforzados-por-fibras-naturales.html>

QUINANCELA, B, "Rehabilitación de la prensa hidráulica para su implementación como máquina de prensado, conformado y montaje en el taller de máquinas herramientas de la facultad de mecánica", [En línea] (Trabajo de titulación). (Pegrado) *Escuela Superior Politécnica De Chimborazo*, Ecuador. 2021. Disponible en:

<http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/15123>

ARISTIZÁBAL, J; & SÁNCHEZ, T; & MEJÍA D, "Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca". Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, (2007).

MEJIA, D; & BERRIOS, S; & MAZO, J; & MEJIA, J, "Structural stability, shape memory and mechanical properties of Fe/Ni core/shell nanorods" *Journal of Alloys and Compounds* 877 (2021), pp.1-9.

IBRAHIM, H; & FARAG, M; & MEGAHED, H; & MEHANNY, S, "Characteristics of starch based biodegradable composites reinforced with date palm and flax fibers" *Elsevier BV*,

Carbohydrate Polymers, Vol. 101, (2014). pp. 11-19.

SHERIF, M; & DARWISH, L; & HALEEM, A; & HABBAK, M; & KASHIF, et al. “Effect of Glue and Temperatures on Mechanical Properties of Starch-Based Biodegradable Composites Reinforced with Bagasse Fibers” *International Journal of Biotechnology and Biomaterials Engineering*, Vol. 1, (2019).

ARBOLEDA, G; & MONTILLA, C; & VILLADA, H, “Efecto de la concentración de anhídrido maléico en películas de almidón termoplástico y ácido poliláctico”. *Grupo de Investigación Ciencia y Tecnología de Biomoléculas de Interés Agroindustrial (CYTBIA)*, (2016).

RAYAS, J; & RODRÍGUEZ, R; & VERA, Y; & MARTÍNEZ, A, “Medición del módulo de Young en el hule látex usando ESPI”. *Revista Mexicana de Física*, (2003), pp.555–564.

MALDONADO, F; & VEGA Á, “Diseño y construcción de un equipo de moldeo por termo presión de desechos plásticos, capacidad 2700 cM3” *Escuela Politécnica del Ejército*, (2010).

LUCAS GUZ, et al, “Carbohydrate Polymers”. *Instituto de Tecnología en Polímeros y Nanotecnología*, (2017), pp1611-1619.

NOGUERA, B, *Los elastómeros: Características y usos* [Blog]; IQR 16 febrero, 2021.

Disponible en: <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2021/02/los-elastomeros-caracteristicas-y-usos.html>

D.S.R.A.I.
Castillo



ANEXOS

ANEXO A: PROCESO DE ELABORACIÓN DE MÁQUINA DE CALOR.



Realizado por: Altamirano, 2022.

ANEXO B: MONTAJE DE MÁQUINA DE CALOR EN PRENSA HIDRÁULICA.



Realizado por: Altamirano, 2022.

ANEXO C: PROCESO DE TRATAMIENTO DE FIBRAS.



Realizado por: Altamirano, 2022.

ANEXO D: RESIDUOS DE FIBRAS LAVADAS.



Realizado por: Altamirano, 2022.

ANEXO E: UTILIZACIÓN DE LA MÁQUINA SEM.



Realizado por: Altamirano, 2022.

ANEXO F: MUESTRAS CORTADAS EN MÁQUINA DE CORTE LASER.



Realizado por: Altamirano, 2022.

ANEXO G: PRESUPUESTO ECONÓMICO.

Material	Marca	Unidades	Costo Unitario \$	Costo total \$
----------	-------	----------	-------------------	----------------

Fibra de cabuya	Mercado de fierros de salcedo	1	5	5
Almidón de Yuca	Karay, Natural foods	5	6	30
Lamina de silicona desmoldante	Golesh	1	50	50
Glicerina	Laboratorio Prolabor	1	13	13
Resistencia eléctrica	Tesla	1	35	35
Termostato con capilar	Tesla	1	18	18
Regulador de Voltaje	Tesla	1	25	25
Acero inoxidable	Novacero	1	50	50
Agua destilada	Laboratorio	3	25	75
Papel Film	Familia	3	2	6
Análisis de laboratorio	Laboratorio Saqmic Riobamba	1	36	36
Armado de circuito eléctrico	Mecánico	1	25	25
Placa de Aluminio	Mecánico	1	260	260
Placa de hierro	Mecánico	1	50	50
TOTAL				678

Realizado por: Altamirano, 2022.



epoch

Dirección de Bibliotecas y
Recursos del Aprendizaje

**UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y
DOCUMENTAL**

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 19 / 01 / 2023

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: Emily Sarai Altamirano Constante
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Ciencias
Carrera: Física
Título a optar: Física
f. responsable: Ing. Cristhian Fernando Castillo Ruiz


D.B.R.A.I.
Cristhian Castillo





epoch

Dirección de Bibliotecas y
Recursos del Aprendizaje


D.B.R.A.I.
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
Cuenca, Ecuador

