

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y
AGROINDUSTRIA**

**ESTUDIO DEL EFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE
PARTÍCULAS PROVENIENTES DE LOS RESIDUOS DE TAGUA
(*Phytelephas aequatorialis macrocarpa*) A UNA MATRIZ DE
POLIESTIRENO**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA
QUÍMICA**

**FLOR MARITZA OÑA CAIZA
(flrmaritza@gmail.com)**

**DIRECTOR: OMAR FERNANDO BONILLA HIDALGO MSc.
(omar.bonilla@epn.edu.ec)**

Quito, Enero del 2017

© Escuela Politécnica Nacional (2017)
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Flor Maritza Oña Caiza, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Flor Maritza Oña Caiza

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Flor Maritza Oña Caiza, bajo mi supervisión.

Omar Bonilla MSc.

DIRECTOR DE PROYECTO

DEDICATORIA

A mis Padres, porque ellos son fuerza, aliento, lucha, alegría y fortaleza en mi vida, su ayuda fue imprescindible para terminar este proyecto. Los amo mucho.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios quien me dio la gracia de levantarme en cada caída, me confortó y animó para insistir, resistir y persistir.

A mis Padres, a Milton, Ade, Sebas y Josué, gracias por su preocupación, por las risas y alegrías que traen a mi vida; son los regalos más hermosos que tengo, sencillamente gracias por existir.

A mi familia: mis tías, mis primos y primas en especial Sol, Mary y Henry gracias por apoyarnos y compartir momentos de locuras.

A mi director Ing Omar, gracias por sus palabras, que me motivaron a continuar y a no abandonar este proyecto; gracias por sus consejos, su paciencia y por todos los momentos compartidos en el querido CTP.

A la Ing Hilda por su ayuda y contribución en este proyecto.

A los amigos del CIAP, Sonia, Juan y Roberto gracias por ayudarme con los equipos y porque las horas de espera eran más amenas charlando con ustedes.

A Ivancito y Liz, gracias por su preocupación y ayuda en lo personal y académico.

Al Ing Quiroz gracias por la apertura para la realización de este proyecto.

A Dianita por su amistad, ayuda y sobre todo el aliento que siempre me brindaste; ¡ánimo! ya te falta poquito.

A mis queridos Pilaguarkingos: Mishu, Gaby, Andre, Cristian, Ismael vivimos tantos momentos en la Poli, compartimos risas, peleas, angustias, decepciones, saliditas en fin, ustedes hicieron que la vida politécnica sea lo que es, un mundo de anécdotas que nos acompañaran la vida entera.

A Grace gracias por su ayuda, preocupación y optimismo; gracias a la música que nos unió.

A mi querido fisioterapeuta Christian, gracias por animarme cuando lo necesitaba y por retarme cada vez que podías, aprendí mucho de ti, gracias afanoso =).

A mi compañera y amiga María José Bautista, eres un gran ejemplo para mí, por tu lucha y tenacidad; somos tan diferentes pero nos complementamos. Gracias por tus consejos, tu preocupación; simplemente gracias por tu amistad.

Finalmente a mi “alter ego” Jorge Luis, amigo solo me queda decirte gracias, muchas gracias, sin ti nada hubiera sido igual, te quejabas y sobre todo molestabas, pero siempre estabas para ayudar; gracias por la paciencia en especial para las interminables horas compartidas en el laboratorio.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN	xv
INTRODUCCIÓN	xvii
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
1.1 Tagua	1
1.1.1 Descripción morfológica y fenología	1
1.1.2 Distribución geográfica	4
1.1.3 Usos y aplicaciones	5
1.1.4 Potencial económico	6
1.1.5 Composición química	7
1.1.5.1 Celulosa	8
1.1.5.2 Hemicelulosa	9
1.1.5.3 Lignina	10
1.1.5.4 Pentosanos	12
1.1.5.5 Compuestos minoritarios	13
1.1.5.6 Cenizas	13
1.2 Materiales compuestos de matriz termoplástica	14
1.2.1 Matrices termoplásticas	15
1.2.1.1 Estructura y propiedades	15
1.2.1.2 Polímeros comúnmente usados como matrices termoplásticas	16
1.2.1.2.1 Poliétileno (PE)	17
1.2.1.2.2 Polipropileno (PP)	17
1.2.1.2.3 Policloruro de vinilo (PVC)	18
1.2.1.2.4 Poliestireno (PS)	18
1.2.2 Materiales de refuerzo	20
1.2.2.1 Fibras vegetales	21
1.2.2.2 Partículas	22
1.2.2.3 Métodos de tratamiento de la superficie de los refuerzos	22
1.2.3 Procesamiento de matrices termoplásticas	23
1.2.3.1 Mezclado	24
1.2.3.1.1 Mezclado dispersivo	24
1.2.3.1.2 Mezclado distributivo	25
1.2.3.2 Tipos de mezcladores	25
1.2.3.2.1 Moldeo por compresión	26
1.2.3.2.2 Moldeo por extrusión	27
1.2.3.2.3 Moldeo por inyección	29
1.2.4 Propiedades mecánicas de los polímeros	31
1.2.4.1 Resistencia a la tracción	32
1.2.4.2 Resistencia a la flexión	34

2. PARTE EXPERIMENTAL	36
2.1	Caracterización de las materias primas 38
2.1.1	Caracterización química de los residuos de la elaboración de los botones de tagua 38
2.1.1.1	Determinación del contenido de humedad 39
2.1.1.2	Determinación del contenido de cenizas 39
2.1.1.3	Determinación del contenido de solubles en agua 40
2.1.1.3.1	Método A – solubilidad en agua fría 40
2.1.1.3.2	Método B – solubilidad en agua caliente 40
2.1.1.4	Determinación del contenido de hemicelulosa 41
2.1.1.5	Determinación del contenido de grasas, ceras y resinas 41
2.1.1.6	Determinación del contenido de celulosa 42
2.1.1.7	Determinación del contenido de lignina 42
2.1.1.8	Determinación del contenido de pentosanos 43
2.1.1.9	Análisis por espectroscopía infrarroja (FT-IR) 44
2.1.1.10	Análisis por termogravimetría (TGA) 44
2.1.2	Caracterización del poliestireno 45
2.1.2.1	Análisis de índice de fluidez (MFI) 45
2.1.2.2	Análisis térmico por calorimetría diferencial de Barrido (DSC) 45
2.1.2.3	Análisis por termogravimetría (TGA) 45
2.1.2.4	Determinación de la densidad 46
2.2	Determinación de las condiciones de procesamiento por extrusión de la matriz de poliestireno con los residuos de tagua. 46
2.2.1	Determinación del perfil de temperatura de la extrusora 47
2.2.2	Calibración de las tolvas de alimentación 47
2.3	Evaluación del efecto de la incorporación de las partículas de tagua a la matriz de poliestireno. 48
2.3.1	Diseño experimental 48
2.3.2	Elaboración de probetas mediante inyección 49
2.3.2.1	Perfil de temperatura de inyección 49
2.3.2.2	Presión de inyección y tiempo de inyección 50
2.3.2.3	Presión de mantenimiento y tiempo de mantenimiento 50
2.3.2.4	Contrapresión en la plastificación y tiempo del ciclo 50
2.3.3	Evaluación de las propiedades mecánicas de la incorporación de partículas de tagua 51
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	52
3.1	Caracterización química de los residuos de la elaboración de botones de tagua 52
3.1.1	Contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina 52
3.1.2	Contenido de componentes minoritarios 54
3.1.3	Contenido de solubles en agua caliente y agua fría 54

3.1.4	Contenido de humedad y cenizas	56
3.1.5	Análisis de espectroscopía FT-IR	57
3.1.6	Análisis termogravimétrico TGA	59
3.2	Caracterización del poliestireno	61
3.2.1	Índice de fluidez	61
3.2.2	Análisis por calorimetría diferencial de barrido DSC	61
3.2.3	Análisis termogravimétrico TGA	62
3.2.4	Determinación de densidad	63
3.3	Condiciones de procesamiento por extrusión de la matriz de poliestireno con los residuos de tagua	64
3.3.1	Perfil de temperatura de la extrusora	64
3.3.2	Calibración de las tolvas de alimentación	66
3.3.2.1	Calibración de la tolva de alimentación primaria	66
3.3.2.2	Calibración de la tolva de alimentación secundaria	67
3.3.3	Tiempo de residencia	69
3.3.4	Enfriamiento y peletizado	70
3.4	Incorporación de las partículas de tagua a la matriz de poliestireno	70
3.4.1	Diseño experimental	70
3.4.2	Índice de fluidez	78
3.4.3	Condiciones de procesamiento por inyección para la elaboración de probetas	81
3.4.3.1	Perfil de temperatura de inyección	81
3.4.3.2	Presión de inyección	82
3.4.3.3	Tiempo de inyección	84
3.4.4	Densidad de las probetas inyectadas	87
3.4.5	Ensayos mecánicos	90
3.4.6	Análisis termogravimétricos	97
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	107
4.1	Conclusiones	107
4.2	Recomendaciones	110
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111
	ANEXOS	118

ÍNDICE DE TABLAS

		PÁGINA
Tabla 1.1.	Taxonomía de la palma de tagua	2
Tabla 1.2.	Análisis proximal de la tagua	8
Tabla 1.3.	Contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina en diferentes fuentes de origen vegetal	12
Tabla 1.4.	Composición química de la madera	14
Tabla 2.1.	Normas empleadas para la caracterización química de los residuos de la elaboración de botones de tagua	38
Tabla 2.2.	Perfil de temperatura de la inyectora BOY 30D para procesar poliestireno	49
Tabla 3.1.	Resultados de la determinación del contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina del polvo de tagua	52
Tabla 3.2.	Resultados de la determinación del contenido de pentosanos, grasas, ceras y resinas del polvo de tagua	54
Tabla 3.3.	Resultados de la determinación del contenido de solubles en agua fría y caliente del polvo de tagua	55
Tabla 3.4.	Resultados de la determinación del contenido de solubles en agua fría y caliente del polvo de tagua con 6 horas de ensayo	56
Tabla 3.5.	Resultados de la determinación de humedad y cenizas del polvo de tagua	56
Tabla 3.6.	Grupos funcionales presentes en el espectro FT-IR de los residuos de tagua	57
Tabla 3.7.	Índice de fluidez del poliestireno virgen realizado a 200 °C y 5 kg con calentamiento de 100 segundos.	61
Tabla 3.8.	Resultados de densidad realizados por inmersión de la muestra de poliestireno en un baño de agua	63
Tabla 3.9.	Perfil de temperatura empleado en el procesamiento de poliestireno y poliestireno con polvo de tagua	65
Tabla 3.10.	Valores de rpm y Hz para obtener el flujo másico del polvo de tagua necesario para cada una de las mezclas fijadas en el diseño experimental	68

Tabla 3.11.	Resultados del tiempo de residencia del poliestireno y el polvo de tagua hasta la cuarta zona, sexta zona y la boquilla de la extrusora	69
Tabla 3.12.	Cantidad disponible de polvo de tagua para el desarrollo experimental	72
Tabla 3.13.	Índice de fluidez determinado a 200 °C y con 5 kg para los pellets obtenidos mediante extrusión a diferentes concentraciones y tamaño de partícula	78
Tabla 3.14.	Análisis de varianza de los resultados de índice de fluidez de los pellets extruidos a diferentes composiciones y tamaño de partícula, utilizando el programa STATGRAPHIC con nivel de confianza del 95 %	79
Tabla 3.15.	Perfil de temperatura de la inyectora para procesar poliestireno y poliestireno con polvo de tagua	81
Tabla 3.16.	Peso de las probetas de poliestireno elaboradas a distintos porcentajes de presiones de inyección 1 y 2, sin presión de mantenimiento	82
Tabla 3.17.	Presiones de mantenimiento determinadas para elaborar probetas a diferentes concentraciones y tamaño de partícula mediante inyección	84
Tabla 3.18.	Tiempo de mantenimiento para elaborar probetas de poliestireno con presión de inyección del 65 % y presión de mantenimiento de 70 % constantes	86
Tabla 3.19.	Tiempo del proceso de inyección para elaborar probetas de poliestireno	86
Tabla 3.20.	Densidad de las piezas inyectadas a diferentes composiciones y tamaño de partícula	88
Tabla 3.21.	Análisis de varianza de los resultados de densidad de las probetas inyectadas a diferentes composiciones y tamaño de partícula; obtenido mediante el programa STATGRAPHICS con nivel de confianza del 95 %	88
Tabla 3.22.	Extensión por carga de flexión de las probetas inyectadas a diferentes composiciones y tamaño de partícula	92
Tabla 3.23.	Esfuerzos de tracción y flexión de las probetas elaboradas mediante inyección a diferentes concentraciones y tamaño de partícula	93
Tabla 3.24.	Análisis de varianza para los resultados de tracción de las probetas inyectadas a diferentes composiciones y tamaño de	

	partícula; obtenido mediante el programa STATGRAPHICS con nivel de confianza del 95 %	94
Tabla 3.25.	Análisis de varianza para los resultados de flexión de las probetas inyectadas a diferentes composiciones y tamaño de partícula; obtenido mediante el programa STATGRAPHICS con nivel de confianza del 95 %	94
Tabla AII.1.	Condiciones de funcionamiento del equipo de inyección para inyectar poliestireno a un molde de probetas	120
Tabla AIV.1.	Determinación de la presión de mantenimiento para las probetas de poliestireno manteniendo constante el tiempo de enfriamiento a 30 segundos y tiempo de mantenimiento en 3 segundos	122
Tabla AVIII.1.	Resultados de la determinación de densidad de las probetas inyectadas a diferentes concentraciones y tamaño de partícula de polvo de tagua con poliestireno	126
Tabla AIX.1.	Perfil de temperatura que se empleó en el procesamiento de poliestireno y poliestireno con polvo de tagua	127
Tabla AX.1.	Valores máximos de extensión y fuerza de probetas de poliestireno virgen	128
Tabla AX.2.	Valores máximos de extensión y fuerza de probetas de poliestireno 95 % y polvo de tagua malla 40	128
Tabla AX.3.	Valores máximos de extensión y fuerza de probetas de poliestireno 90 % y polvo de tagua malla 40	129
Tabla AX.4.	Valores máximos de extensión y fuerza de probetas de poliestireno 85 % y polvo de tagua malla 40	129
Tabla AX.5.	Valores máximos de extensión y fuerza de probetas de poliestireno 95 % y polvo de tagua malla 60	130
Tabla AX.6.	Valores máximos de extensión y fuerza de probetas de poliestireno 90 % y polvo de tagua malla 60	130
Tabla AX.7.	Valores máximos de extensión y fuerza de probetas de poliestireno 85 % y polvo de tagua malla 60	131
Tabla AX.8.	Valores máximos de extensión y fuerza de probetas de poliestireno 95 % y polvo de tagua malla 80	131
Tabla AX.9.	Valores máximo y tagua s de extensión y fuerza de probetas de poliestireno 90 % y polvo de tagua malla 80	132

Tabla AX.10. Valores máximos de extensión y fuerza de probetas de poliestireno 85 % y polvo de tagua malla 80	132
--	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

		PÁGINA
Figura 1.1.	Fotografías del fruto de la palma de tagua a) fruto o corozo, b) semillas envueltas en el mesocarpio, c) corte transversal del fruto	2
Figura 1.2.	Corte transversal de la semilla de tagua madura	3
Figura 1.3.	Semilla de tagua madura e inmadura	4
Figura 1.4.	Estructura de la cadena de celulosa	9
Figura 1.5.	Estructura de la cadena de hemicelulosa	10
Figura 1.6.	Estructura de la cadena de lignina	11
Figura 1.7.	Esquema de los componentes de las hemicelulosas	12
Figura 1.8.	Estructuras poliméricas: a) estructura lineal de los polímeros, b) entrecruzamiento de baja densidad, c) entrecruzamiento de alta densidad	16
Figura 1.9.	Estructura del polietileno	17
Figura 1.10.	Estructura del polipropileno	17
Figura 1.11.	Estructura del policloruro de vinilo	18
Figura 1.12.	Estructura del poliestireno	19
Figura 1.13.	Clasificación general de las fibras	21
Figura 1.14.	Representación de tipo de mezclado dispersivo	25
Figura 1.15.	Representación de tipo de mezclado distributivo	25
Figura 1.16.	Moldeo por compresión: 1) carga del material; 2) y 3) compresión y fundido; 4) retirado de la pieza.	26
Figura 1.17.	Diagrama de un máquina de extrusión	28
Figura 1.18.	Diagrama de un máquina de moldeo por inyección	30
Figura 1.19.	Curva representativa de esfuerzo versus deformación	33
Figura 1.20.	Curva esfuerzo versus deformación para un material frágil	33
Figura 1.21.	Esquema del ensayo de flexión en tres puntos	35

Figura 2.1	Esquema del proceso propuesto para la caracterización química de los residuos de tagua	36
Figura 3.1.	Espectro FT-IR del polvo de tagua molido y tamizado en malla 40 y retenido en malla 60	58
Figura 3.2.	Curva de análisis TGA al polvo de tagua molido y tamizado en malla 40 y retenido en malla 60	60
Figura 3.3.	Termograma obtenido en el análisis térmico DSC, en el segundo proceso de calentamiento para determinar la temperatura de transición vítrea del poliestireno.	62
Figura 3.4.	Termograma obtenido en el análisis térmico TGA de poliestireno virgen realizado bajo atmosfera de nitrógeno hasta la temperatura de 800 °C.	63
Figura 3.5.	Fotografías de poliestireno extruido con polvo de tagua. a) poliestireno y polvo de tagua degradados, b) muestras de poliestireno con polvo de tagua degradados a varias temperaturas, c) poliestireno y polvo de tagua a las condiciones de temperatura definidas para su procesamiento	65
Figura 3.6.	Curva de calibración de la tolva principal de la extrusora doble husillo co-rotante CLAMSHELL PSHJ-35 para alimentar poliestireno	66
Figura 3.7.	Curva de calibración del flujo másico de tagua versus el número de revoluciones del rotor de la tolva de alimentación secundaria.	67
Figura 3.8.	Gráfico del porcentaje de retenido acumulado de los residuos de la elaboración de botones de tagua a distintas mallas	71
Figura 3.9.	Análisis granulométrico de los residuos de la elaboración de botones de tagua y determinación del d_{80} de la muestra inicial	72
Figura 3.10.	Análisis granulométrico de los residuos de la elaboración de botones de tagua y determinación del d_{80} de la muestra molida	73
Figura 3.11.	Placas obtenidas mediante moldeo por compresión para evaluar dispersión y distribución de pellets con 5 % polvo de tagua de malla 40: a) placa realizada a 180 °C, 10 minutos y 4 000 psi, b) placa realizada a 180 °C, 15 minutos y 4 000 psi	73
Figura 3.12.	Placas obtenidas mediante moldeo por compresión para evaluar dispersión y distribución de pellets con 5 % de polvo de tagua de malla 40: a) placa realizada a 150 °C, 4 000 psi y 10 minutos, b) placa realizada a 150 °C, 4 000 psi y 15 minutos c) ampliación de la placa a), d) ampliación de la placa b)	74

Figura 3.13.	Placas obtenidas mediante moldeo por compresión para evaluar dispersión y distribución en pellets con polvo de tagua de malla 40: a) composición 95 % poliestireno 5 % polvo de tagua, b) composición 90 % poliestireno 10 % polvo de tagua, c) composición 85 % poliestireno 15 % polvo de tagua	75
Figura 3.14.	Placas obtenidas mediante moldeo por compresión para evaluar dispersión y distribución en pellets con polvo de tagua de malla 60: d) composición 95 % poliestireno 5% polvo de tagua, e) composición 90 % poliestireno 10 % polvo de tagua, f) composición 85 % poliestireno 15 % polvo de tagua	76
Figura 3.15.	Placas obtenidas mediante moldeo por compresión para evaluar dispersión y distribución en pellets con polvo de tagua de malla 80: g) composición 95 % poliestireno 5% polvo de tagua, h) composición 90 % poliestireno 10 % polvo de tagua, i) composición 85 % poliestireno 15 % polvo de tagua	76
Figura 3.16.	Probetas obtenidas mediante inyección a diferentes concentraciones y tamaño de partícula	77
Figura 3.17.	Diagrama de Pareto estandarizado de los resultados del índice de fluidez de los pellets extruidos a diferentes composiciones y tamaño de partícula; utilizando el programa STATGRAPHICS con nivel de confianza del 95 %	80
Figura 3.18.	Gráfica de los efectos principales para el índice de fluidez de los pellets extruidos a diferentes concentraciones y tamaño de partícula; gráfico obtenido del análisis de resultados mediante STATGRAPHICS con nivel de confianza del 95 %	80
Figura 3.19.	Gráfica de porcentaje de presión de inyección 1 y 2 versus el peso de inyección de las probetas de poliestireno	83
Figura 3.20.	Diagrama de Pareto estandarizado de la densidad de las probetas obtenidas mediante inyección a diferentes concentraciones y tamaño de partícula; gráfico obtenido del análisis de resultados mediante STATGRAPHICS con nivel de confianza del 95 %	89
Figura 3.21.	Gráfica de los efectos principales de la densidad de las probetas obtenidas mediante inyección a diferentes concentraciones y tamaño de partícula; gráfico obtenido del análisis de resultados mediante STATGRAPHICS con nivel de confianza del 95 %	89
Figura 3.22.	Gráfica de carga de flexión versus concentración del polvo de tagua de las mallas 40, 60 y 80 en probetas elaboradas mediante inyección	90

Figura 3.23.	Gráfica de carga de flexión versus extensión de las probetas de poliestireno con polvo de tagua malla 40 a diferentes composiciones elaboradas mediante inyección	92
Figura 3.24.	Diagrama de Pareto estandarizado de los resultados del ensayo de tracción de las probetas inyectadas a diferentes composiciones y tamaño de partícula; gráfico obtenido mediante STATGRAPHICS con nivel de confianza del 95 %	95
Figura 3.25.	Diagrama de Pareto estandarizado de los resultados del ensayo de flexión de las probetas inyectadas a diferentes composiciones y tamaño de partícula; gráfico obtenido mediante STATGRAPHICS con nivel de confianza del 95 %	95
Figura 3.26.	Gráfica de los efectos principales para los resultados del ensayo de tracción de las probetas inyectadas a diferentes composiciones y tamaño de partícula; gráfico obtenido mediante STATGRAPHICS con nivel de confianza del 95 %	96
Figura 3.27.	Gráfica de los efectos principales para los resultados del ensayo de flexión de las probetas inyectadas a diferentes composiciones y tamaño de partícula; gráfico obtenido mediante STATGRAPHICS con nivel de confianza del 95 %	97
Figura 3.28.	Curva de análisis TGA de la muestra de matriz de poliestireno con 5 % polvo de tagua malla 40	98
Figura 3.29.	Curva de análisis TGA de la muestra de matriz de poliestireno con 10 % polvo de tagua malla 40	99
Figura 3.30.	Curva de análisis TGA de la muestra de matriz de poliestireno con 15 % polvo de tagua malla 40	100
Figura 3.31.	Curva de análisis TGA de la muestra de matriz de poliestireno con 5 % polvo de tagua malla 60	101
Figura 3.32.	Curva de análisis TGA de la muestra de matriz de poliestireno con 10 % polvo de tagua malla 60	102
Figura 3.33.	Curva de análisis TGA de la muestra de matriz de poliestireno con 15 % polvo de tagua malla 60	103
Figura 3.34.	Curva de análisis TGA de la muestra de matriz de poliestireno con 5 % polvo de tagua malla 80	104
Figura 3.35.	Curva de análisis TGA de la muestra de matriz de poliestireno con 10 % polvo de tagua malla 80	105
Figura 3.36.	Curva de análisis TGA de la muestra de matriz de poliestireno con 15 % polvo de tagua malla 80	106

Figura AI.1.	Fotografías de las placas tipo <i>flash</i> empleadas para la elaboración de las placas de poliestireno y polvo de tagua	119
Figura AI.2.	Dimensiones del molde empleado para la elaboración de las placas de poliestireno y polvo de tagua para evaluar dispersión y distribución	119
Figura AIII.1.	Probetas elaboradas mediante inyección a diferentes presiones desde 5 % a 80 % de la presión específica de inyección	121
Figura AV.1.	Dimensiones de las probetas elaboradas mediante inyección para el ensayo de tracción	123
Figura AV.2.	Dimensiones de las probetas para el ensayo de flexión	123
Figura AVI.1.	Espectros de las muestras de los residuos de tagua (azul) y de la muestra después de ser tratada bajo el ensayo de determinación de celulosa (verde)	124
Figura AVII.1.	Hoja de especificaciones del poliestireno cristal de propósito general entregado por el proveedor	125
Figura AXI.1.	Curva esfuerzo versus deformación del poliestireno cristal de propósito general	133
Figura AXI.2.	Curva esfuerzo versus deformación de probetas con poliestireno 95 % y polvo de tagua 5 % de malla 40	133
Figura AXI.3.	Curva esfuerzo versus deformación de probetas con poliestireno 90 % y polvo de tagua 10 % de malla 40	134
Figura AXI.4.	Curva esfuerzo versus deformación de probetas con poliestireno 85 % y polvo de tagua 15 % de malla 40	134
Figura AXI.5.	Curva esfuerzo versus deformación de probetas con poliestireno 95 % y polvo de tagua 5 % de malla 60	135
Figura AXI.6.	Curva esfuerzo versus deformación de probetas con poliestireno 90 % y polvo de tagua 10 % de malla 60	135
Figura AXI.7.	Curva esfuerzo versus deformación de probetas con poliestireno 85 % y polvo de tagua 15 % de malla 60	136
Figura AXI.8.	Curva esfuerzo versus deformación de probetas con poliestireno 95 % y polvo de tagua 5 % de malla 80	136
Figura AXI.9.	Curva esfuerzo versus deformación de probetas con poliestireno 90 % y polvo de tagua 10 % de malla 80	137

Figura AXI.10. Curva esfuerzo versus deformación de probetas con poliestireno 85 % y polvo de tagua 15 % de malla 80

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
ANEXO I Moldes de las placas para la evaluación de dispersión y distribución	119
ANEXO II Parámetros de funcionamiento de la inyectora BOY 30D	120
ANEXO III Probetas inyectadas a distintas presiones	121
ANEXO IV Determinación de la presión de mantenimiento	122
ANEXO V Probetas para ensayo de tracción y flexión	123
ANEXO VI Resultados del análisis de espectroscopía FT-IR para la muestra de polvo de tagua	124
ANEXO VII Hoja de especificaciones técnicas del poliestireno virgen	125
ANEXO VIII Resultados de la determinación de la densidad del poliestireno virgen	126
ANEXO IX Perfil de temperatura de la extrusora	127
ANEXO X Resultados de las pruebas de flexión	128
ANEXO XI Gráficos de los ensayos de tracción	133

RESUMEN

En este estudio se incorporaron residuos de la elaboración de botones de tagua a una matriz de poliestireno, considerando como variables de estudio la concentración y el tamaño de partícula del polvo de tagua, y como variables de respuesta ensayos mecánicos de tracción y flexión.

La investigación inició con la caracterización de las materias primas: poliestireno y polvo de tagua. En el caso de los residuos de la elaboración de los botones de tagua se realizó una caracterización química que permitió determinar su composición.

De los resultados obtenidos se determinó que la tagua es un material lignocelulósico compuesto mayoritariamente de celulosa y hemicelulosa con un porcentaje promedio de 50,68 y 34,48 % respectivamente y el resto corresponde a lignina, humedad, y componentes minoritarios. También se realizaron análisis por espectroscopía FT-IR para identificar los grupos funcionales presentes en la estructura de la tagua así como análisis termogravimétricos TGA para determinar la estabilidad térmica de la muestra.

El poliestireno fue sometido a ensayos térmicos, DSC para determinar su temperatura de transición vítrea, resultando un valor de 100,9 °C y termogravimétrico TGA para determinar la temperatura inicial de degradación de 235,16 °C las cuales sirvieron como parámetros para establecer las condiciones de procesamiento.

Luego de la caracterización de las materias primas se fijaron las condiciones de trabajo tanto para extrusión como para inyección. Se determinó el perfil de temperatura de extrusión e inyección considerando los resultados de los análisis térmicos del polvo de tagua y del poliestireno. Se fijó 1 kg/h como flujo de poliestireno a ser extruido; el flujo de poliestireno y el flujo de alimentación del polvo de tagua se determinaron mediante la elaboración de curvas de calibración para las tolvas primaria y secundaria.

A través del control de peso de las probetas de poliestireno elaboradas a diferentes presiones, se establecieron las presiones de inyección y mantenimiento en un valor de 65 y 70 % de la presión específica de inyección respectivamente.

La cantidad máxima de polvo de tagua incorporada a la matriz fue de 15 % ya que a mayor concentración se produjo fractura del fundido. En cuanto al análisis estadístico realizado a los resultados de los ensayos mecánicos de tracción y flexión de las probetas inyectadas, se determinó que el principal factor que afecta a las propiedades mecánicas es el tamaño de partícula del polvo de tagua.

INTRODUCCIÓN

Actualmente se desarrollan procesos para la mezcla de polímeros con fibras o materiales lignocelulósicos con la finalidad de obtener nuevos materiales con propiedades mecánicas modificadas que sean deseables y que mejoren la relación costo beneficio, además se busca contribuir con el medio ambiente empleando residuos de otros procesos para darles un valor agregado (Lopez, 2013, p. 90). En el desarrollo de mezclas de materiales lignocelulósicos con matrices termoplásticas las que comúnmente han sido empleadas son polietileno y polipropileno, mientras que las fibras estudiadas son: cáñamo, yute, lino, ramio, sisal, coco y en cuanto a partículas se emplea aserrín de distintos tipos de árboles (Miravete, 2012, p. 2; Jara, 2015, pp. 5,6; Villamar, 2013, pp. 3,7).

El poliestireno cristal PS uno de los termoplásticos más utilizado a escala industrial, por su transparencia y facilidad de procesamiento, fue empleado para estudiar el comportamiento de las tensiones residuales mediante fotoelasticidad en el procesamiento por inyección, analizándose variables como temperatura del molde y tiempo de enfriamiento (Brieva, 2011, p. 32). Otras propiedades como la estabilidad térmica, baja densidad, buenas propiedades eléctricas son las que permiten emplear este material en la elaboración de menaje doméstico y juguetes (Barroso, Gil y Camacho , 2008, p. 577). Aunque la ductilidad y la resistencia mecánica son bajas comparadas con otros polímeros, el poliestireno no ha sido empleado como matriz para obtener materiales compuestos.

Las semillas de tagua *Phytelephas aequatorialis macrocarpa*, por sus características de dureza y brillo constituyen una fuente de ingresos para los artesanos que elaboran artesanías y botones que son vendidos tanto a nivel nacional como internacional (PROECUADOR Instituto de Promoción de Exportaciones, 2013). La elaboración de los botones de tagua genera gran cantidad de residuos, entre el polvo y los restos de tagua sólida pueden llegar a alcanzar de 65 hasta 88 % del peso inicial de la semilla. Estos residuos no son utilizados para un fin específico, en algunas ocasiones son empleados como balanceado para el ganado; sin embargo, la mayoría de estos residuos son

desechados, incrementando la cantidad de residuos orgánicos que son arrojados a los botaderos (Valencia, Montufar, Navarrete y Balslev, 2013, p. 197).

En cuanto a la caracterización química de la tagua no hay referencias respecto al contenido celulosa, hemicelulosa y lignina, que son los componentes mayoritarios de los materiales lignocelulósicos; solo se conoce de la presencia de mananos lineales, los cuales son los principales componentes de la estructura de las hemicelulosas. No obstante, Carvajal Miguel investigador ecuatoriano obtuvo gel de nanocelulosa a partir de la biomasa de la tagua, lo que hace presumible el contenido de celulosa en la misma (Pratyooosh y Brett, 2012, p. 43; Chávez-Sifontes y Domine, 2013, p. 16).

En este trabajo se obtuvo un nuevo material cuya matriz termoplástica es poliestireno y como material de refuerzo se empleó polvo de los residuos de la elaboración de botones de tagua; para determinar la formulación adecuada y el porcentaje de cada uno de estos componentes, es importante determinar su estructura química; ya que la tagua al ser un producto de origen vegetal, evidencia claramente una naturaleza hidrófila, por los enlaces hidroxilos que tienen los polisacáridos de las celulosas y hemicelulosas (Martinez y Silva, 2015, p. 142). Mientras el poliestireno de naturaleza hidrófoba presenta incompatibilidad con el polvo de tagua; por lo que se requiere la modificación de la superficie del polvo de tagua mediante un proceso físico de secado con la finalidad de reducir la energía interfacial entre las fases, con ello se busca mejorar la adhesión interfacial y permitir una mejor dispersión y estabilidad de la mezcla (Bledzki, Sperber y Faruk, 2002, p. 15).

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este capítulo se presenta la información tanto de la tagua (*Phytelephas aequatorialis macrocarpa*) cuya semilla constituye la materia prima para la elaboración de botones de tagua; así como de matrices termoplásticas y los procesos de transformación de los termoplásticos. Además de una síntesis de las propiedades mecánicas de los materiales plásticos.

1.1 TAGUA

La tagua corresponde a la semilla de la palma *Phytelephas aequatorialis macrocarpa*, que se encuentra en las cercanías de los ríos y aluviales de la costa Ecuatoriana, las provincias en las que crece con mayor abundancia son Esmeraldas, Manabí, Guayas, Los Ríos y el Oro. Para sus habitantes las características físicas de dureza y brillo han hecho que este material sea fuente de ingresos y se emplee por los artesanos para elaborar artesanías y botones que son vendidos tanto a nivel nacional como internacional (Southgate, Coles y Salazar, 1995, pág. 10; Valencia, Montufar, Navarrete y Balslev, 2013, p. 191)

1.1.1 DESCRIPCIÓN MORFOLÓGICA Y FENOLOGÍA

La palma puede alcanzar una altura aproximada de 8 a 10 m y el tallo entre 25 y 30 cm de diámetro, sus hojas alcanzan 8 m de largo. Cada palma puede producir entre 15 y 16 frutos al año, estos se encuentran en la parte superior de la palma y presentan un epicarpio grueso, con numerosas proyecciones espinosas duras de color marrón oscuro, mientras el mesocarpio o parte interna del fruto es carnoso, delgado y de color amarillento; el fruto puede medir unos 30 cm de diámetro y contener de 4 a 6 semillas de diversos tamaños (Valencia, Montufar, Navarrete y Balslev, 2013, p. 187). La producción de los primeros frutos se da a partir de los 14 a 15 años, cuando la planta ha alcanzado la madurez; luego de la floración y

fructificación se dan anualmente de manera continua con un pico de producción de la fruta en la época de verano (Clay y Clement, 1993, p. 213). En la Tabla 1.1 se presenta la taxonomía de la planta.

Tabla 1.1. Taxonomía de la palma de tagua

Familia	<i>Palmae (arecaceae)</i>
Especie	<i>Phytelephas aequatorialis spruce</i>
Sinónimos	<i>Palandra aequatorialis (spruce)</i>
Nombres comunes	“Marfil vegetal”, “cade o cadí”, “coroso”, “mococho”, “cabeza de negro”, (Colombia, Ecuador); “yarina”, “jarina” (Péru, Brasil); “vegetable ivory” (English); “vegetablische Elfenbein” (German); “avorio vegetable” (Italian); “ivoire végétal” (French).

(Clay y Clement, 1993, p. 58)

Las semillas inmaduras poseen un endospermo homogéneo gelatinoso y algo transparente que al secarse se hace duro, de color blanco marfil, pesado, liso y opaco; sin embargo, adquiere brillo mediante el pulido; la Figura 1.1, muestra el fruto de la palma de tagua y la semilla.



Figura 1.1. Fotografías del fruto de la palma de tagua a) fruto o corozo, b) semillas envueltas en el mesocarpio, c) corte transversal del fruto

Las plantas en general pueden producir pocas o una gran cantidad de semillas de distintos tamaños, formas, colores con cubiertas lisas o de ornamentación variada, algunas suelen ser blandas y otras muy resistentes o duras como es el caso de la semilla de la palma *Phytelephas aequatorialis macrocarpa*; sin embargo, estas se ablandan con la presencia de agua (Seguí, 2011, p. 216).

La semilla de la tagua presenta dimensiones de 5 a 7 cm, está formada por un embrión, sustancias de reserva o endospermo y envuelta por una cubierta seminal, tegumento o epispermo como se observa en la Figura 1.2. El tegumento es de color marrón, y consta de dos partes: testa y tegmen, la testa es delgada pues el endocarpio del fruto es leñoso y actúa como barrera protectora frente a las agresiones del medio externo, en cuanto al tegmen este presenta un color más oscuro y de apariencia membranosa mientras el endospermo es de tonalidades blancas; en el endospermo se almacenan las sustancias de reserva generalmente hidratos de carbono, proteínas y lípidos (Espinosa y Mann, 1999, p. 28; Valencia, Montufar, Navarrete y Balslev, 2013, p. 190).

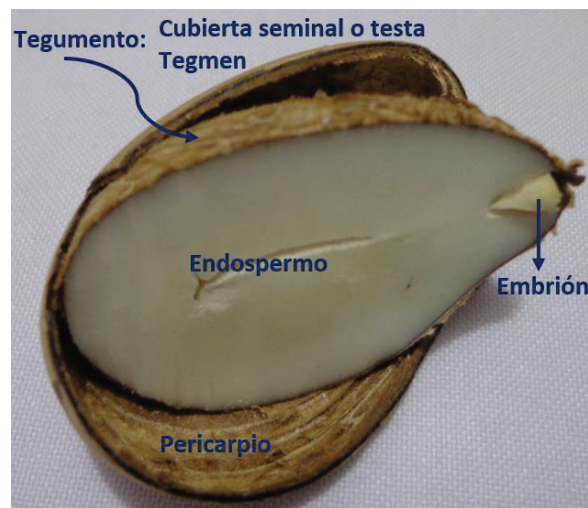


Figura 1.2. Corte transversal de la semilla de tagua madura

La semilla de tagua inicialmente presenta un endospermo con alto contenido de agua y apariencia gelatinosa que corresponde a un gel polisacárido muy hidratado como se observa en la Figura 1.3. El análisis del endospermo maduro de las semillas de tagua revela que está constituido básicamente por polisacáridos

denominados mananos, específicamente mananos lineales y otros azúcares como glucosa y galactosa. El mesocarpio está formado de lípidos entre ellos los más representativos son oleico, palmítico y linoleico. Además posee minerales como calcio, potasio y zinc (Valencia, Montufar, Navarrete y Balslev, 2013, p. 191; Pratyosh y Brett, 2012, p. 43).



Figura 1.3. Semilla de tagua madura e inmadura

En el proceso de maduración de las semillas existe ruptura de los enlaces glucosídicos, con aporte de azúcares por parte de la pared celular, no obstante, los agentes externos provocan el inicio de mecanismos que forman moléculas de corta longitud (7 a 12 azúcares) denominados evocadores que estimulan la síntesis de fitolexinas que son derivados fenólicos de bajo peso molecular como mecanismo de defensa y de glucosidasa β ; estos aceleran la hidrólisis de los enlaces glucosídicos por polimerización de glucosas, pérdida de agua y en ciertos casos lignina. Las semillas de tagua contienen altas cantidades de polisacáridos hemicelulósicos, los cuales se acumulan en las paredes celulares, provocando que estas sean gruesas, duras y pesadas (Paniagua, et al., 2007, p. 321).

1.1.2 DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA

La palma de tagua *Phytelephas aequatorialis macrocarpa* se puede encontrar desde el nivel del mar hasta los 1 800 msnm aunque la mayor concentración de

los mismos es a partir de 400 a 1 500 msnm. Las palmas se hallan en zonas húmedas a lo largo de los ríos y valles fluviales de Colombia, Ecuador, Perú y Brasil. Para el crecimiento de estas palmas se requiere temperaturas y precipitaciones mayores a 18 °C y 2 500 mm respectivamente (Clay y Clement, 1993, p. 215).

1.1.3 USOS Y APLICACIONES

La semilla de tagua es la parte de la planta con mayores usos y aplicaciones, por sus propiedades ha sido empleada como sustituto del marfil de origen animal; las artesanías que se elaboran con la tagua son producto de la habilidad y creatividad de los artesanos que fabrican figuras sobre la flora y la fauna ecuatoriana, llaveros, aretes, cadenas, pulseras, botones entre otros; sin embargo, las semillas de tagua al estar en contacto con agua se hidratan con facilidad, e incluso pueden disolverse y ser atacado por hongos (Clay y Clement, 1993, p. 216).

En Ecuador las primeras estadísticas de exportación de tagua aparecen en 1865 y para el año de 1929 la cantidad de tagua exportada alcanzó las 25 000 toneladas métricas. Antes de la primera guerra mundial la tagua fue uno de los productos de mayor exportación, tanto que para 1920 el 20 % de los botones elaborados en Estados Unidos y Alemania eran de tagua; sin embargo, con el apareamiento del plástico se redujo drásticamente las exportaciones (Valencia, Montufar, Navarrete y Balslev, 2013, p. 197).

Las raíces de la palma son utilizadas para elaborar bebidas medicinales por sus propiedades diuréticas, el tallo macizo y duro es empleado para el entablado de construcciones, las hojas se usan en cubiertas y entechados que pueden durar de 5 a 6 años, las inflorescencias o flores se emplean como escobas e incluso con sus fibras se puede elaborar cordelería y del fruto se obtiene un jugo de alto poder nutritivo. El endospermo de la semilla es consumido tanto por humanos como por animales, aporta calcio 116 mg/100 g, potasio 841 mg/100 g y zinc 1,3 mg/100 g (Koziol, 1993, p. 17; Valencia, Montufar, Navarrete y Balslev, 2013, p. 195).

1.1.4 POTENCIAL ECONÓMICO

Las semillas de tagua tienen gran importancia desde el punto de vista comercial, ya que son empleadas como materia prima tanto en elaboración de botones de tagua como en la manufactura de artesanías los cuales son de interés nacional e internacional; los residuos de estos procesos se utilizan en la elaboración de balanceado para animales y en cuanto a las semillas inmaduras estas son utilizadas en la alimentación del ser humano. Actualmente las semillas de tagua maduras han incrementado sus ventas tanto que entre los años 2008 y 2012 se alcanzó un incremento del 60 % en los precios de exportación (Valencia, Montufar, Navarrete y Balslev, 2013, p. 197).

De acuerdo con los datos del Banco Central del Ecuador, en la subpartida 9606.29 del año 2013, los principales destinos de exportación de botones de tagua fueron: Turquía, Hong Kong, Italia, Alemania, España y China a los cuales se exportó entre 35,4 y 169,09 toneladas de botones de tagua (PROECUADOR Instituto de Promoción de Exportaciones, 2013, p. 10).

Ecuador es uno de los pocos países que trabaja en la elaboración de botones, artesanías y bisutería a partir de la semilla de tagua, estos productos son apreciados en mercados internacionales; las exportaciones de artículos de tagua a mercados internacionales generaron un ingreso al país de 7 693 miles de USD al 2012, lo que corresponde al 35,74 % de participación de productos exportados en el sector de artesanías, con un crecimiento promedio anual del 2,16 % (PROECUADOR Instituto de Promoción de Exportaciones, 2013, p. 12).

El elevado potencial y la tasa de crecimiento que se proyecta en la venta de productos terminados elaborados a partir de la semilla de tagua requieren del desarrollo de procesos industriales que aprovechen este recurso y los residuos que se puedan generar. Cabe recalcar que en la fabricación de animelas de tagua para la elaboración de botones existen subproductos como el polvillo y restos de tagua sólida que pueden alcanzar entre el 65 al 88 % de desperdicio (Valencia, Montufar, Navarrete y Balslev, 2013, p. 193).

1.1.5 COMPOSICIÓN QUÍMICA

La composición química de la tagua se estudia desde el punto de vista de un material lignocelulósico, es decir con la presencia de celulosa, hemicelulosa y lignina básicamente. Pratyoosh y Brett (2012), manifiestan que el endospermo de la tagua está constituido principalmente de mananos los que a su vez se clasifican en manano lineal, glucomanano, galactomanano y galactoglucomanano principales componentes de las hemicelulosas.

Los mananos lineales poseen como unidad estructural principal a la manosa; en la tagua hay dos componentes, manano I y manano II, el primero tiene una estructura cristalina mayor que el manano II, en cuanto al tamaño molecular el manano I tiene menor peso molecular que el manano II. Los mananos lineales se encuentran en la periferia de la semilla mientras los galactomananos se produce en la sección intermedia de la semilla (p. 43).

Barfod (1991), además de aseverar la presencia de manano I y II afirma que el manano I extraído con hidróxido de potasio tiene cadenas de 10 a 13 unidades de hexosas y libera 97,6 % de manosa y el porcentaje restante corresponde a galactosa y glucosa.

El manano II tiene cadenas de 39 a 40 unidades de hexosa y libera 98,3 % de manosa, lo demás pertenece a galactosa y glucosa (p. 27). Saldarriaga, Zuluaga, y Gañan (2007), también mencionan la presencia de otros sacáridos como xilosa, arabinosa y ramosa (p. 9).

En cuanto a la composición química de la tagua los estudios antes mencionados determinan como componente principal de las semillas de tagua a la manosa; sin embargo, Salazar Villón (2006), presenta un análisis proximal de la semilla de tagua considerándolo como un alimento para balanceado, tal como se observa en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Análisis proximal de la tagua

Análisis Químico de la Tagua		
Parámetros	Unidad	Resultados
Humedad a 100 °C	% w/w	8,9
Cenizas	% w/w	1,39
Grasas	% w/w	0,83
Proteínas (N x 5,7)	% w/w	3,51
Carbohidratos por diferencia	% w/w	85,37
Energía	kcal/100 g	326,06
Fibras	% w/w	17,93

(Salazar Villón, 2006, p. 75)

1.1.5.1 Celulosa

La celulosa es un biopolímero semicristalino con un grado de polimerización de al menos 15 000; está compuesto por unidades β -D-glucopiranososa que se unen entre sí mediante enlaces glucosídicos $\beta(1\rightarrow4)$.

Debido a la presencia de hidroxilos en su estructura existe una tendencia a formar uniones intra e intermoleculares mediante puentes hidrógenos que dan lugar a la formación de microfibrillas, cuya superficie polar favorece la absorción de humedad y disminuye la compatibilidad con materiales no polares dificultando la dispersión en los materiales compuestos (Martinez y Silva, 2015, p. 142).

La celulosa es el principal componente de la pared celular secundaria de los materiales lignocelulósicos y puede representar más del 50 % en peso de los mismos, por lo que es uno de los biopolímeros más abundantes (Chávez-Sifontes y Domine, 2013, p. 16).

La estructura de la cadena de celulosa se presenta en la Figura 1.4.

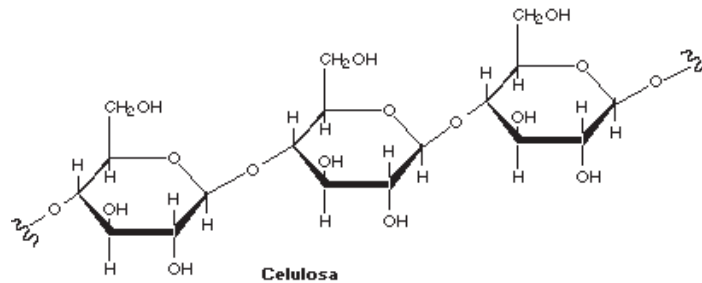


Figura 1.4. Estructura de la cadena de celulosa
(Haiping, Rong, Hanping, Dong Ho, y Chuguang, 2007, p. 1783)

1.1.5.2 Hemicelulosa

Las hemicelulosas son polisacáridos ramificados con un grado de polimerización entre 100 y 200, por lo cual tienen una menor masa molecular, son insolubles en agua pero fáciles de disolver y degradar en medio alcalino. Los monosacáridos que proporcionan las diversas ramificaciones a su estructura son pentosas: D-arabinosa, D-xilosa; hexosas: D-galactosa, D-manosa, D-fucosa, D-ramnosa y ácidos urónicos como el D-ácido glucorónico y D-ácido galacturónico que están unidos a la cadena principal mediante enlaces $\beta(1\rightarrow4)$ y/o $\beta(1\rightarrow3)$ (Martinez y Silva, 2015, p. 142).

Las hemicelulosas representan entre el 20 y 43 % de los materiales lignocelulósicos, su función es servir de matriz y soporte para las microfibrillas de celulosa. La variación del porcentaje y de la estructura de las hemicelulosas presentes en las distintas especies e incluso dentro de la fisiología vegetal de una determinada especie se debe a la presencia de grupos heterogéneos (Suarez, Del Rio, y Bolaños, 2010, p. 9).

Un mayor contenido de hemicelulosa con una menor presencia de ramificaciones ha sido determinado para las plantas herbáceas de tal manera que el porcentaje de celulosa y lignina en estas plantas se reduce considerablemente a menos del 20 %, inclusive existen algunas plantas en cuyas hojas la presencia de lignina es nula (Cuervo, Folch, y Quiroz, 2009, p. 14). La estructura de la cadena de hemicelulosa se presenta en la Figura 1.5.

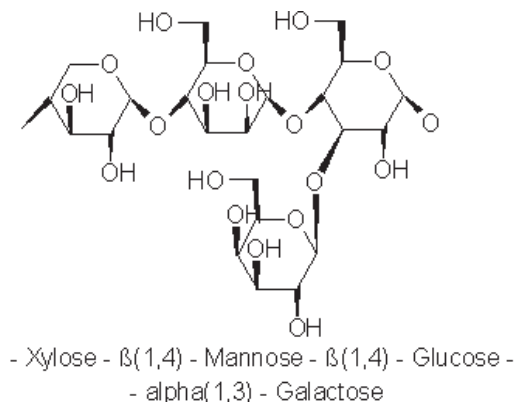


Figura 1.5. Estructura de la cadena de hemicelulosa
(Pratyosh y Brett, 2012, p. 43)

1.1.5.3 Lignina

La palabra lignina proviene del latín lignum que significa madera, es uno de los compuestos químicos de las paredes celulares que producen la madera y cumple funciones como transporte de agua, nutrientes y metabolitos. Está formada por compuestos aromáticos que se unen entre sí dando lugar a una estructura no definida tridimensional y amorfa (Chávez-Sifontes y Domine, 2013, p. 16).

La lignina es un biopolímero fenólico tridimensional de estructura compleja que está formada por la dehidrogenación enzimática de alcoholes derivados del fenil propano; después de la celulosa es el segundo biopolímero más abundante ya que representa entre el 18 y 33 % de peso en base seca en materiales lignocelulósicos; sin embargo, se pueden encontrar casos de materiales no maderables en los que el contenido de lignina puede ser menor al 10 %; en estos casos los resultados pudieron verse afectados por interferencias producidas por proteínas y los ácidos hidroxinámicos (Sazanov y Gribanov, 2010, p. 178).

La lignina dentro de las paredes celulares forma enlaces covalentes con las hemicelulosas y la celulosa. La presencia de lignina aumenta de manera evidente con la maduración de la planta y cumple la función de protección tanto microbiana como de resistencia a la descomposición ya que le confiere rigidez e impermeabilidad a las paredes (Martinez y Silva, 2015, p. 142).

En cuanto a la estructura de la lignina no se ha definido una estructura precisa ya que hay una distribución variada de las múltiples unidades estructurales que se acoplan aleatoriamente con diferentes uniones o tipos de enlace que se observan en la Figura 1.6; la lignina se clasifica dependiendo del método de extracción o su origen, en ligninas tipo kraft, sulfito, soda, klasom cada una responde a un tipo de extracción diferente (Chávez-Sifontes y Domine, 2013, p. 20). El contenido y tipo de lignina varía dependiendo del grupo de plantas que se estudien; en una misma planta el porcentaje, tipo de unidades de lignina así como el tipo de uniones presentes en la estructura varían dependiendo de la edad y la parte de la planta que se tome la muestra (Cuervo, Folch, y Quiroz , 2009, p. 13).

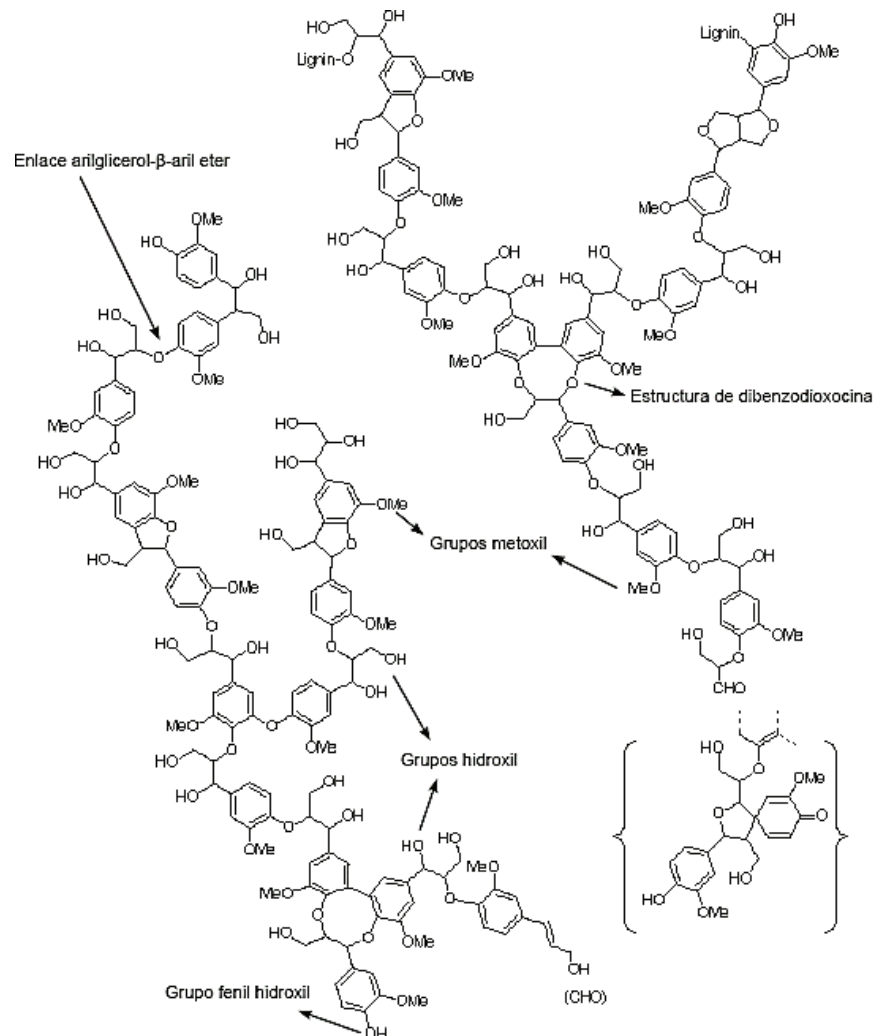


Figura 1.6. Estructura de la cadena de lignina
(Chávez-Sifontes y Domine, 2013, p. 17)

En la Tabla 1.3 se observan los porcentajes de celulosa, hemicelulosa y lignina que se encuentran en diferentes plantas y partes de la planta.

Tabla 1.3. Contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina en diferentes fuentes de origen vegetal

Fuente	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)
Paja de cebada	40-45	28-30	20-22
Madera	44-50	20-26	17-30
Bagazo de caña	45-50	20-30	25-30
Forraje de maíz	36	23	17
Paja de trigo	33	25	23
Paja de arroz	34	25	23

(Cuervo, Folch, y Quiroz , 2009, p. 14)

1.1.5.4 Pentosanos

Los pentosanos están constituidos por monosacáridos de cinco átomos de carbono, por lo que están constituidas por pentosas que al desdoblarse forman los pentosanos. Estos pueden formar parte de la estructura de las hemicelulosas como se observa en la Figura 1.7.

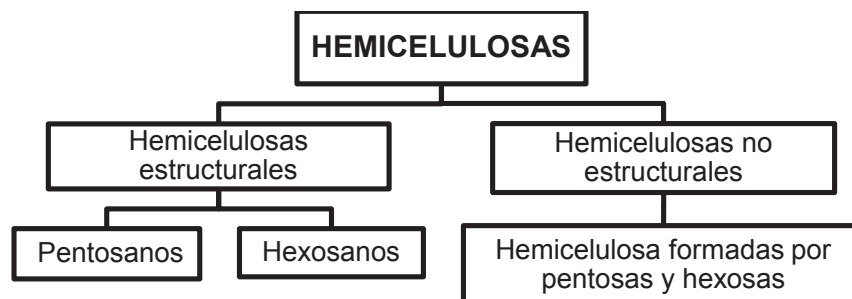


Figura 1.7. Esquema de los componentes de las hemicelulosas
(Paz, 2008, p. 24)

1.1.5.5 Compuestos minoritarios

Entre los compuestos minoritarios que se encuentran en los materiales lignocelulósicos se encuentran: grasas, ceras, resinas, gomas y almidón; estos son insolubles en agua y otros solventes polares pero solubles en solventes no polares como benceno.

Los compuestos minoritarios son producto de la actividad celular de la planta, su composición depende de los factores medioambientales y puede constituir entre el 3 y 10 % en base seca de la madera.

Los lípidos tienden a acumularse como cuerpos lipídicos subcelulares y comprenden grasas y aceites; los ácidos grasos encontrados en las semillas pueden presentarse en variadas proporciones, siendo los más abundantes palmítico, oleico y linoleico, estos aceites han sido reportados como parte de la composición de las semillas de tagua (García M. , 2009, p. 27).

1.1.5.6 Cenizas

Las cenizas corresponden a pequeñas cantidades de calcio, potasio y magnesio, aunque se puede encontrar otros elementos como sodio, manganeso, titanio, hierro; generalmente el contenido de estos no es mayor al 1 %, además puede existir la presencia de sílice. La composición depende de las condiciones medioambientales en las que se desarrolle la planta (Paz, 2008, p. 25).

En general la composición de los materiales lignocelulósicos presenta amplios rangos dependiendo de la muestra. En la Tabla 1.4 se muestra los porcentajes de composición química típica de maderas duras y maderas suaves, se observa que los polisacáridos y lignina son los que tienen mayor porcentaje mientras que los lípidos y cenizas son los que se encuentran en menor porcentaje, además se muestra el amplio rango en los porcentajes de solubles en agua caliente y agua fría

Tabla 1.4. Composición química de la madera

Componentes	Maderas duras (%)	Maderas suaves (%)
Holocelulosa	59,8 – 80,9	71,0 – 89,1
Pentosas	4,5 – 17,5	12,6 – 32,3
Lignina	21,7 – 37,0	14,0 – 34,6
Extractivos (agua caliente)	0,2 – 14,4	0,3 – 11,0
Extractivos (agua fría)	0,5 – 10,6	0,2 – 8,9
Extractivos (eter)	0,2 – 8,5	0,1 – 7,7
Cenizas	0,02 – 1,1	0,1 – 5,4

(Paz, 2008, p. 27)

1.2 MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ TERMOPLÁSTICA

Los materiales compuestos en general son sistemas que tienen más de un componente; estos materiales están constituidos por una fase continua que corresponde a la matriz y otra fase discontinua que es el refuerzo, estos componentes no deben fusionarse completamente y se deben diferenciar entre sí. Los materiales compuestos se clasifican dependiendo de su matriz en metálicas, cerámicas y poliméricas; en cuanto a los refuerzos estos pueden ser fibras o partículas (Besednjak, 2005, p. 16).

Las funciones de la matriz polimérica son: transmitir los esfuerzos a la fibra a través de la interface, proteger a las fibras de los esfuerzos de compresión, preservar el orden establecido de las fibras y protegerlas de la humedad y ataques químicos. Los materiales compuestos elaborados a partir de polímeros buscan obtener nuevos materiales con mejores propiedades mecánicas y resistentes a la corrosión y a los agentes químicos (Carragher, 2005, p. 30). Para obtener un material compuesto con propiedades específicas y diferentes, se deben elegir las mejores combinaciones refuerzo-matriz, ya que las propiedades del nuevo material van a depender del tipo de interfaz y de las características de cada uno de los componentes (Besednjak, 2005, p. 15).

1.2.1 MATRICES TERMOPLÁSTICAS

Los plásticos han cobrado gran importancia en los últimos años, sus propiedades como baja densidad, alta resistencia química, facilidad en los procesos de transformación, reciclabilidad, bajos costos de producción han puesto en la mira a estos materiales empleándolos a grandes escalas y con una amplia variedad de usos desde utensilios domésticos hasta prótesis humanas (Saldarriaga, Zuluaga, y Gañan, 2007, p. 7).

El término polímero significa muchas unidades de repetición; “poli” muchos y “mer” unidad de repetición. Los polímeros son macromoléculas que tienen una unidad estructural llamada monómero que se repiten y se unen mediante enlaces covalentes hasta formar moléculas de alto peso molecular (Carraher, 2005, p. 59). Los polímeros comúnmente conocidos como plásticos provienen de productos petroquímicos cuyas unidades estructurales pueden ser alifáticas y/o aromáticas.

1.2.1.1 Estructura y propiedades

La estructura de los polímeros determina factores como cristalinidad, rigidez, flexibilidad, brillo. La arquitectura clasifica al polímero en lineal, ramificado y entrecruzado, de estas estructuras dependen sus propiedades, características y establecen su utilidad.

Las cadenas poliméricas tiene la capacidad de organizarse para formar secciones cristalinas que son las que conceden las propiedades de rigidez o flexibilidad; las estructuras más lineales establecen polímeros de mayor densidad, mayor grado de cristalización, mayor temperatura de fusión y resistencia química; sin embargo, se reduce el brillo y la transparencia (Carraher, 2005, p. 30).

Los polímeros lineales son cadenas flexibles que están unidas mediante fuerzas de Van der Waals, las cadenas lineales pueden estar conectadas entre sí hasta constituir un polímero ramificado, estas uniones generan un menor

empaquetamiento lo que disminuye la densidad del polímero, mientras la presencia de cadenas lineales adyacentes unidas mediante enlaces covalentes a otra cadena forman un polímero entrecruzado. Los polímeros ramificados y entrecruzados se obtienen mediante síntesis por reacciones químicas (Camuña, 2013, p. 50).

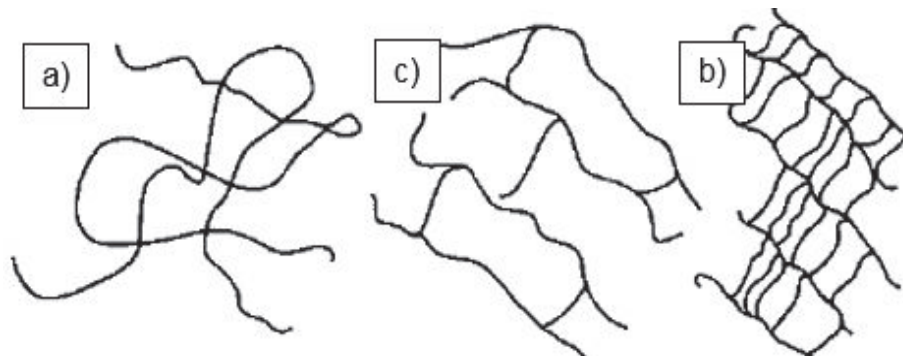


Figura 1.8. Estructuras poliméricas: a) estructura lineal de los polímeros, b) entrecruzamiento de baja densidad, c) entrecruzamiento de alta densidad (Carraher, 2005, p. 26)

En los procesos de transformación, el efecto del calor y el cizallamiento provoca que las estructuras amorfas o cristalinas sean modificadas para conseguir ciertas propiedades. El polímero al ser fundido puede enrollarse y formar estructuras con alto grado de ordenamiento o completamente irregular, este efecto modifica sus propiedades, por tal razón en los procesos de transformación es importante establecer parámetros como la velocidad de fusión, el tiempo de enfriamiento, intensidad de la nucleación. Además en estos procesos existe reducción de la masa y la alteración de su distribución producto de la ruptura de ciertos enlaces (Carraher, 2005, p. 30).

1.2.1.2 Polímeros comúnmente usados como matrices termoplásticas

Los termoplásticos son polímeros de largas cadenas que mediante calentamiento se reblandecen, pueden ser moldeados y enfriados para obtener el producto final, los más empleados en la industria son: polietileno (PE), polipropileno (PP), cloruro de polivinilo (PVC), poliestireno (PS) (Groover, 2007, p. 10).

1.2.1.2.1 Polietileno (PE)

Es un polímero lineal parcialmente cristalino que posee una alta resistencia al impacto, a la tracción, es flexible y no es frágil. Es soluble en la mayoría de solventes orgánicos a bajas temperaturas. Empleado principalmente en bolsas de supermercado, envases de alimentos, plásticos de embalaje. Comercialmente se encuentra polietileno de alta densidad HDPE, baja densidad LDPE, lineal de baja densidad LLDPE, de peso molecular ultra alto UHMWPE (Camuña, 2013, p. 63).

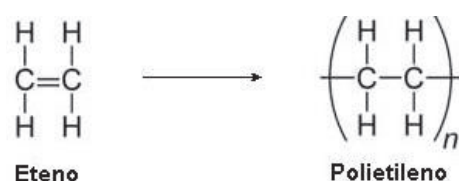


Figura 1.9. Estructura del polietileno
(Camuña, 2013, p. 63)

1.2.1.2.2 Polipropileno (PP)

Es un polímero semicristalino cuyas propiedades dependen intrínsecamente del grado de cristalinidad y peso molecular; es incoloro, posee buena resistencia a la tracción e impacto además de buena resistencia química y es económico. Es más rígido que el PE, tiene alta resistencia química por lo que se emplea como reemplazo a otros plásticos de ingeniería; es el más empleado como matriz de los refuerzos. Sus principales usos están en la industria automovilística, electrodomésticos, una de sus desventajas es su pobre resistencia a la fusión (Camuña, 2013, p. 64).

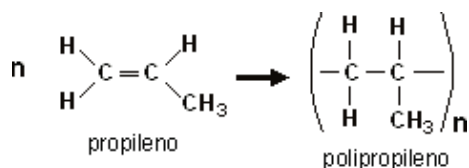


Figura 1.10. Estructura del polipropileno
(Camuña, 2013, p. 64)

1.2.1.2.3 Policloruro de vinilo (PVC)

El policloruro de vinilo es conocido comúnmente por sus siglas PVC, es un polímero lineal de pocas ramificaciones, sus propiedades especialmente las que se relacionan con la estabilidad térmica y lumínica dependen del grado de gelificación. Posee alta resistencia mecánica, al impacto y la abrasión. Se caracteriza por ser rígido pero esta propiedad se modifica con la adición de plastificantes. Generalmente es resistente a agentes externos y químicos; sin embargo, al ser expuesto a altas temperaturas sufre deshidrocloración autocatalítica. Sus usos más comunes son en tuberías y perfiles (Camuña, 2013, p. 66).

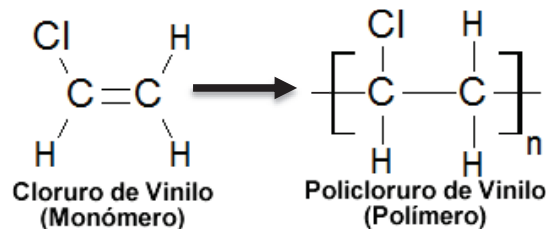


Figura 1.11. Estructura del policloruro de vinilo
(Camuña, 2013, p. 66)

1.2.1.2.4 Poliestireno (PS)

Este polímero se obtiene de la polimerización del estireno, este a su vez es producto de la reacción Friedel-Crafts entre el benceno y polietileno del cual se obtiene etilbenceno que al deshidrogenarse produce estireno (Birley, Heath, y Scott, 1994, p. 48). Fue sintetizado en 1930 en Alemania antes que inicie la primera guerra mundial, por sus excelentes propiedades eléctricas se continuó desarrollando posguerra.

Se comercializa aproximadamente desde 1937 y se caracteriza por alta resistencia a álcalis, ácidos, agentes oxidantes y reductores y escasa absorción de agua, además de poseer baja densidad, buena estabilidad térmica y dimensional conjuntamente con bajos costos; también fluye fácilmente lo que

favorece su uso en el moldeo por inyección (Plastics Europe, 2015; Beltrán Rico y Marcilla Gomis, 2012, p. 25).

El poliestireno es un termoplástico de estructura lineal, atáctico y amorfo que hace que sea transparente. El poliestireno isotáctico fue sintetizado con la finalidad de mejorar las propiedades mecánicas pues el atáctico es frágil y quebradizo. Se comercializa en tres formas: el poliestireno cristal de propósito general GPPS, el de alto impacto HIPS y el expandible EPS (Solís, Lisperguer y Arencibia, 2005, p. 250).

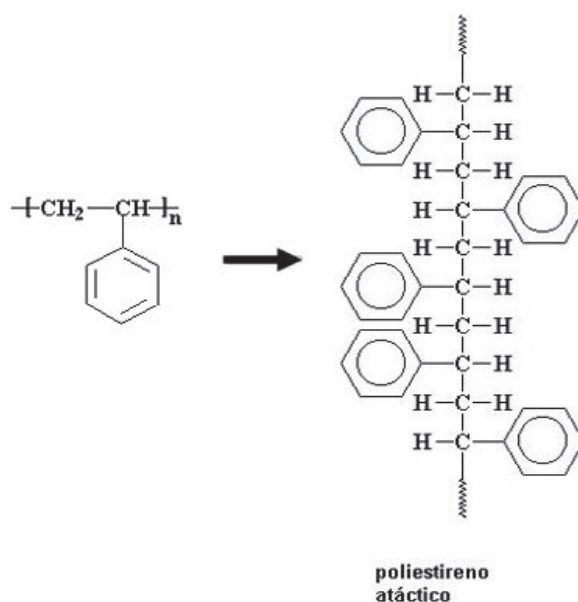


Figura 1.12. Estructura del poliestireno
(Beltrán Rico y Marcilla Gomis, 2012, p. 25)

El poliestireno cristal es rígido y quebradizo, posee bajas resistencias al impacto, a la tracción, y se puede alargar hasta un 1 %. Su temperatura de transición vítrea (T_g) está en un rango de 74 a 110 °C, a mayores valores de T_g es moldeable y a menores temperaturas es un cristal vítreo.

Debido a su baja temperatura de transición vítrea puede moldearse fácilmente; sin embargo, puede degradarse a temperaturas superiores a 150 °C por ello se recomienda evitar largos tiempos de permanencia del polímero en estado fundido (Solís, Lisperguer, y Arencibia, 2005, p. 251). En cuanto a las propiedades ópticas

el poliestireno cristal es transparente e incoloro y puede alcanzar porcentajes de reflectancia de hasta el 95 %. Es susceptible a la degradación a la luz solar por la radiación UV en una longitud de onda de 300 a 400 nm produciendo amarillamiento y reducción de propiedades mecánicas así como menor alargamiento a la ruptura y menor resistencia al impacto (Birley, Heath y Scott, 1994, p. 56)

Las propiedades ópticas del poliestireno permiten utilizar este polímero en la fabricación de lentes, ventanas, materiales para alumbrado. También se emplea en la fabricación de partes de electrodomésticos y automóviles; sin embargo, es más ampliamente usado en juguetes, menaje doméstico, carcazas, perfiles y en el embalaje decorativo de cosméticos y productos alimenticios. En la fabricación de envases que estén en contacto con los alimentos la FDA garantiza su utilidad pues califica al poliestireno como un material de baja toxicidad (Birley, Heath y Scott, 1994, p. 48)

1.2.2 MATERIALES DE REFUERZO

El uso de fibras para la elaboración de materiales compuestos se remonta a varios siglos atrás cuando se mezclaba paja con arcilla para construir muros; con el pasar de los años el uso de fibras naturales como material de refuerzo fue olvidado por la aparición de la industria de los plásticos. Actualmente se busca incorporar fibras naturales y de madera a los plásticos, ya que una combinación adecuada entre los refuerzos y las matrices originan materiales con mejores propiedades que las que presentan el refuerzo y la matriz por separado (Miravete, 2012, p. 1; Lopez, 2013, p. 97)

Los refuerzos son fibras donde la matriz rodea dichas fibras protegiéndolas y orientándolas de tal manera que la carga aplicada se transfiere a las fibras; los refuerzos también pueden ser partículas, éstas se distribuyen en toda la matriz con la finalidad de reforzarla e incluso existen refuerzos híbridos donde se incluyen fibras y partículas (Newel, 2010, p. 227).

1.2.2.1 Fibras vegetales

El empleo de recursos vegetales incluye maderas, plantas, desechos agrícolas, pasto, papel, etc. Estos recursos se procesan por diferentes métodos con la finalidad de emplear cada fracción vegetal en la elaboración de nuevos materiales con mejores propiedades. Las fibras a base de celulosa provienen de diversas partes de las plantas, por ejemplo de hojas, tallos y semillas como muestra la Figura 1.13.

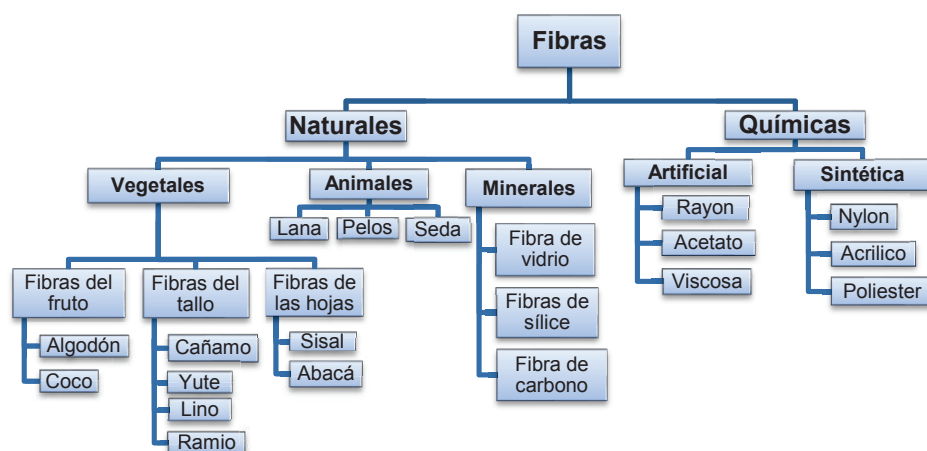


Figura 1.13. Clasificación general de las fibras
(Pesok, 2012, p. 131)

En las fibras vegetales hay fibras largas y cortas que pueden usarse en la fabricación de filtros, envases, geotextiles y materiales compuestos moldeados. Actualmente se producen materiales compuestos empleando fibras como cáñamo, yute, lino, etc., que favorecen la relación costo beneficio, ya que son baratas y su impacto en el medio ambiente es mínimo; sin embargo, en ocasiones el precio prima en lugar de las exigencias técnicas, limitando a estos productos a ser componentes interiores y no estructurales debido a las deficiencias como baja resistencia a la tracción e impacto además de la pobre resistencia a la humedad que pueden presentar estos materiales (Bledzki, Sperber y Faruk, 2002, p. 3).

El proceso de adición de refuerzos a la matriz termoplástica existen parámetros que se deben tomar en cuenta como la cantidad de fibra que se agregue, ya que si no existe suficiente matriz que rodee las fibras y las enlace, la eficiencia de la

trasferencia de carga disminuye notablemente y como resultado se tiene una baja resistencia a la tracción y alta absorción de humedad; también se debe considerar la capacidad de humectación y la adhesión entre el refuerzo y la matriz. La mayoría de materiales reforzados con fibra agregan a su composición entre 35 y 50 % en peso de fibra (Bledzki, Sperber y Faruk, 2002, p. 7; Newel, 2010, p. 232).

1.2.2.2 Partículas

Los materiales reforzados con partículas habitualmente no presentan la misma resistencia que los que son reforzados con fibra; sin embargo, en compensación estos son más económicos y fáciles de elaborar. Las partículas están distribuidas de manera aleatoria con la finalidad de soportar fuerzas de compresión en todas las direcciones.

Debido a la dificultad que tienen las partículas de ligarse a la matriz, existe limitación en cuanto a la resistencia del material resultante; por lo que un material reforzado con una carga dura pero con una matriz débil fallará al estar expuesto a bajas cargas de tracción; sin embargo, se puede incrementar el módulo del material reforzado, reducir la ductilidad y permeabilidad de la matriz (Newel, 2010, p. 238).

1.2.2.3 Métodos de tratamiento de la superficie de los refuerzos

El empleo de fibras vegetales y madera para desarrollar materiales compuestos requiere de procesos que permitan modificar la superficie de las fibras, con la finalidad de alcanzar mejores propiedades y además sean económicamente rentables. Los compuestos lignocelulósicos presentan modificaciones en sus estructuras dependiendo de las condiciones de procesamiento o extracción mediante el cual fueron obtenidos; estas modificaciones van a determinar el tipo de unión que se obtenga entre la matriz y el refuerzo (Bledzki, Sperber, y Faruk, 2002, p. 15)

Las fibras de celulosa son de naturaleza hidrófila por lo que al ser agregada a un matriz que generalmente es hidrófoba existe incompatibilidad entre las dos. Para disminuir este efecto existen tanto métodos físicos como métodos químicos, que modifican las superficies de las fibras logrando una mejor adhesión; además en ciertos casos para lograr compatibilidad es necesario agregar un tercer material, que posea propiedades intermedias entre la fibra y la matriz (Villamar, 2013, p. 59).

Los métodos físicos para modificar la superficie de las fibras son: estiramiento, calandrado y termotratamiento. Estos tratamientos modifican las propiedades estructurales y superficiales de la fibra y por lo tanto influyen en la unión mecánica a los polímeros (Bledzki, Sperber, y Faruk, 2002, p. 15).

Los métodos químicos son impregnación y mercerizado, estos generan un cambio en la tensión superficial de las fibras. La impregnación emplea productos químicos o soluciones de polímeros de baja viscosidad que saturan las fibras, este método se puede realizar al vacío o a presión. El mercerizado corresponde a un tratamiento alcalino que se utiliza en los tejidos de algodón, en el mercerizado los factores a considerarse son: concentración de la solución alcalina, tiempo y temperatura (Bledzki, Sperber, y Faruk, 2002, p. 16).

En cuanto a los agentes de agentes de acoplamiento, son materiales cuya función es eliminar una capa débil y producir un capa resistente y flexible conocida como interfaz entre el refuerzo y la matriz, con esta interfaz se mejora la capacidad de humectación, disminuyendo la tensión superficial y generando enlaces covalentes entre los dos materiales (Jara, 2015, p. 22).

1.2.3 PROCESAMIENTO DE MATRICES TERMOPLÁSTICAS

Los materiales termoplásticos son tratados mediante procesos térmicos en los cuales se funde el polímero y se mezcla con otro polímero, colorantes, aditivos o cargas para obtener otro material con propiedades diferentes. Al emplearse fibras

como material de refuerzo, es importante considerar la estabilidad térmica de las mismas ya que su temperatura de procesamiento es menor a las temperaturas de procesamiento de las matrices termoplásticas, por ello se sugiere el empleo de termoplásticos cuyas temperaturas de procesamiento no excedan los 230 °C para que puedan ser utilizarlos conjuntamente con fibras vegetales y madera (García, 1995).

En la industria existen diferentes procesos para elaborar materiales compuestos a partir de matrices termoplásticas, estos procesos son moldeo por inyección, moldeo por compresión y extrusión; estos procesos tienen dos etapas: el mezclado y el moldeo (Montalvo Soberón, 2007, p. 9).

1.2.3.1 Mezclado

El mezclado corresponde a la primera etapa del procesamiento de las matrices termoplásticas, esta fase es importante pues debe garantizar la calidad del material obtenido, este debe ser homogéneo y de adecuada composición. Al realizar mezclas de polímeros con partículas es necesario determinar la cantidad y el tamaño de partículas por unidad de área de la mezcla, para lo cual es necesario conocer los conceptos de mezclado dispersivo y distributivo (Camuña, 2013, p. 138).

1.2.3.1.1 Mezclado dispersivo

En este tipo de mezclado hay una reducción del tamaño de las partículas a la vez que se produce la distribución de las mismas, también hay una mayor demanda de esfuerzo en el procesamiento de tal manera que existe ruptura de las cadenas poliméricas lo que puede generar degradación. Con este mezclado se generan piezas homogéneas con buenas propiedades físicas y mecánicas (Camuña, 2013, p. 138). La Figura 1.14, muestra el resultado de emplear un mezclado dispersivo.



Figura 1.14. Representación de tipo de mezclado dispersivo
(Beltrán Rico y Marcilla Gomis, 2012, p. 81)

1.2.3.1.2 Mezclado distributivo

Este tipo de mezclado evidencia una mayor distribución de las partículas sin denotar reducción del tamaño de las mismas, como se observa en la Figura 1.15. Este mezclado no es propio para evaluar mezclas entre polímeros pero si permite valorar la distribución de cargas o refuerzos en una matriz polimérica. Además no requiere de mayores esfuerzos, aunque en las zonas de plastificación de equipos como la extrusora se busca mejorar la dispersión de las cargas en la matriz (Camuña, 2013, p. 139).

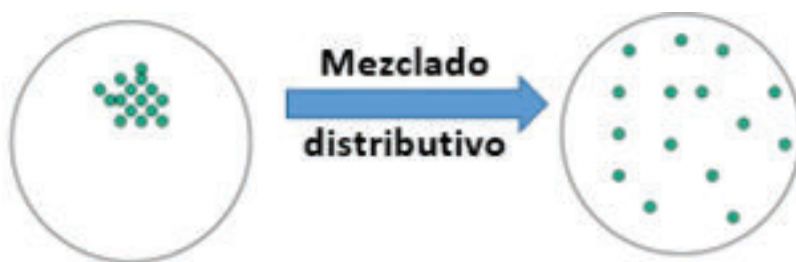


Figura 1.15. Representación de tipo de mezclado distributivo
(Beltrán Rico y Marcilla Gomis, 2012, p. 81)

1.2.3.2 Tipos de mezcladores

Para la obtención de un producto homogéneo en el mercado se pueden encontrar diferentes equipos mezcladores de tipo batch y continuos. Entre los mezcladores tipo batch están el molino de rodillo y el mezclador interno bambury ambos

generan grandes esfuerzos por lo que impulsan un buen mezclado tanto dispersivo como distributivo. Entre los mezcladores continuos están el mezclador estático y las extrusoras mono husillo y doble husillo (Camuña, 2013, p. 126).

1.2.3.2.1 Moldeo por compresión

El moldeo por compresión es el proceso de transformación más antiguo empleado tanto para materiales termoplásticos como para termoestables. Se emplea para la producción de perfiles con cualquier material preimpregnado a la matriz termoplástica, requiere de un molde con la forma requerida.

El proceso consiste en cargar material a un molde calefactor, luego se juntan las dos partes del molde comprimiendo la carga y esparciendo el material por toda la cavidad del molde, inmediatamente se funde la carga y se espera que la pieza adopte la forma del molde para finalmente abrir el molde y retirar la pieza (Groover, 2007, p. 286). Este proceso se observa en la Figura 1.16.

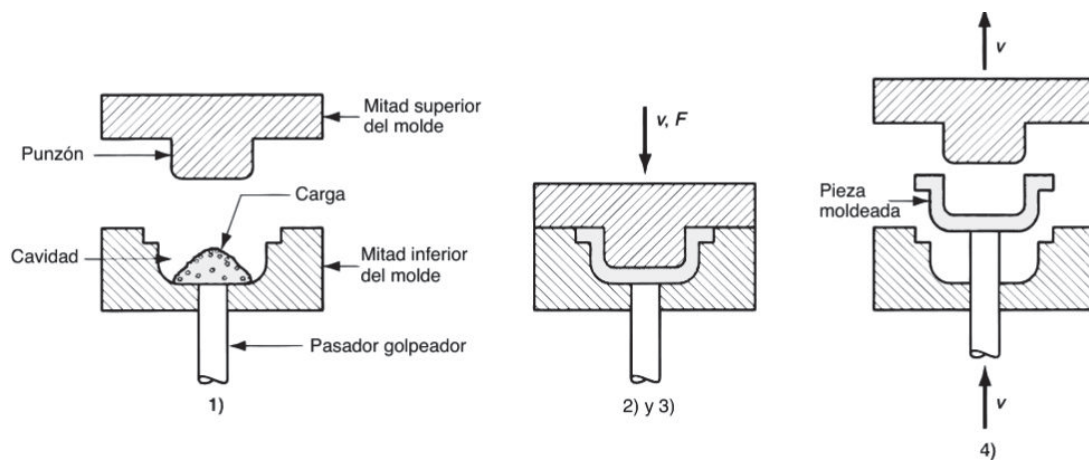


Figura 1.16. Moldeo por compresión: 1) carga del material; 2) y 3) compresión y fundido; 4) retirado de la pieza.
(Groover, 2007, p. 286)

Este tipo de moldeo permite el procesamiento de materiales ya sean estos en polvo, pellets o incluso líquidos; no obstante se requiere determinar la cantidad de material necesario para obtener piezas uniformes de similares propiedades.

1.2.3.2 Moldeo por extrusión

La extrusión es un proceso continuo en el cual se obliga al material a fluir a través de un orificio con forma determinada para obtener un producto largo de sección transversal determinada por el orificio, posteriormente será cortado a la longitud deseada; con este proceso se pueden fabricar productos tales como películas y láminas, recubrimiento de cables, tuberías, y perfiles (Groover, 2007, p. 261).

Los elementos de la extrusora son:

- a. Tornillo de extrusión, este se encuentra dentro del cilindro y es el responsable del transporte, fundido y mezclado del material, por ende de este depende el proceso y la calidad del producto final.
- b. El cilindro o barril envuelve al tornillo y debe soportar altas fuerzas de cizallamiento en su interior, además cuenta con un sistema de calentamiento a base de resistencias eléctricas y un encamisado con fluidos refrigerantes para controlar el perfil de temperatura.
- c. La tolva contiene el material a ser extruido y su función es proporcionar un flujo constante de material, generalmente incluyen dispositivos de agitación o tornillos giratorios.
- d. La placa rompedora y los filtros, tienen como función retener los contaminantes que pueda tener el extruido, además de favorecer el mezclado y la homogenización.
- e. El cabezal y el troquel, son un solo sistema que está atornillado cuya finalidad es proporcionar un flujo continuo de material de la forma deseada que al salir de la boquilla se enfría y relaja (Camuña, 2013, pp. 150-155).

En la Figura 1.17 se pueden observar los elementos de la extrusora.

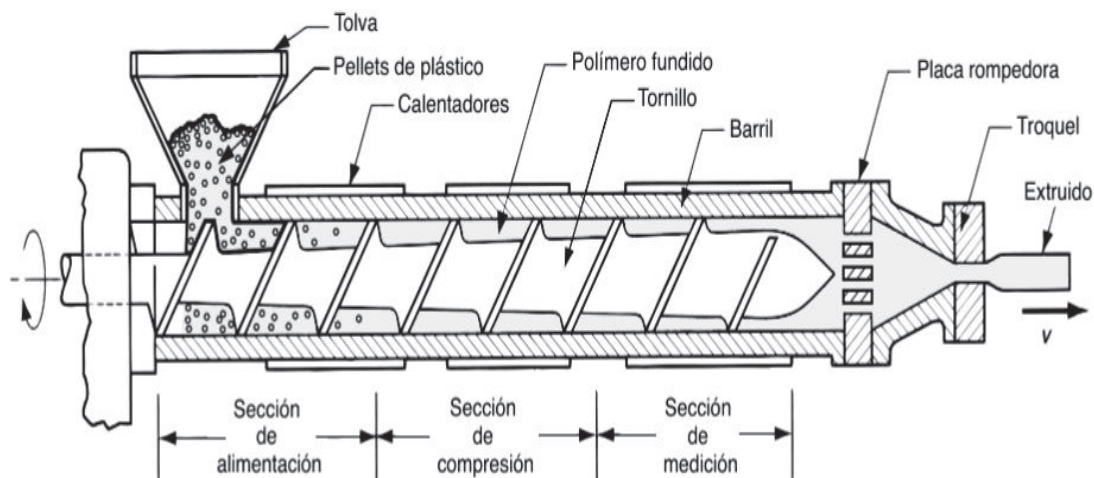


Figura 1.17. Diagrama de una máquina de extrusión
(Groover, 2007, p. 262)

El tornillo extrusor transporta el material desde la tolva hacia la boquilla y tiene varias secciones, la primera es la de alimentación, donde el material proveniente de la tolva y recibe un precalentamiento para luego pasar a la zona de compresión donde funde y comprime eliminando gases. Finalmente pasa a la zona de medición donde el material fundido se homogeniza y es bombeado a través de la boquilla (Groover, 2007, p. 262).

En el mercado se encuentran dos tipos de extrusora, las de doble husillo y las mono husillo. Los extrusores dobles husillos son preferidos a escala industrial ya que generan una mayor fuerza de cizalla, lo que favorece la capacidad de mezcla y versatilidad; las extrusoras de doble tornillo mezclan fibras y otros materiales celulósicos con termoplásticos.

Para la extrusión es necesario determinar la combinación adecuada de las variables del proceso para limitar la degradación térmica de la madera y fibras vegetales, las variables del proceso a considerarse son la velocidad del tornillo y el perfil de temperaturas del barril, cuyos valores deben ser tales que eviten la degradación térmica y el oscurecimiento de la carga (Camuña, 2013, p. 149).

Las ventajas de este proceso son la producción continua y las altas tasas de producción con productos de calidad, además de un amplio rango de control del

proceso para obtener productos de formas y acabados deseados; sin embargo, se requiere de alta inversión de espacio y dinero.

En cuanto a los defectos producidos en la extrusión tenemos los siguientes:

- **Fractura de fundido:** Es una de las fallas más importantes, es provocada por las altas tensiones que actúan sobre el fundido en su paso a través del troquel, se manifiesta formando irregularidades en la superficie del fundido (Groover, 2007, p. 270).
- **Piel de tiburón:** Es provocado por la fricción entre el polímero fundido y la sección transversal del troquel por la que fluye el material extruido; esta fricción genera un perfil de velocidad en el cual el núcleo del polímero fundido se mueve a mayor velocidad que en la superficie que está en contacto con el barril (Groover, 2007, p. 270).
- **Tronco de bambú:** Se produce cuando el gradiente de velocidad es mucho mayor, se producen marcas más prominentes generando un defecto más severo y dando un aspecto a la superficie como el de un tronco de bambú (Groover, 2007, p. 270).

1.2.3.2.3 Moldeo por inyección

El moldeo por inyección es un proceso donde el material es calentado y fundido para luego ser inyectado a altas presiones hacia la cavidad de un molde cerrado donde toma la forma del molde al enfriarse y solidificarse, finalmente se abre el molde y se expulsa la pieza elaborada.

Este ciclo puede durar de 10 a 30 segundos aunque también se puede encontrar ciclos de más de un minuto. El moldeo por inyección requiere un polímero con bajo peso molecular para mantener baja la viscosidad y facilitar la obtención de piezas complejas (Groover, 2007, p. 275).

El ciclo de moldeo inicia con el molde abierto, por lo que el ciclo arranca cerrando el molde, luego inyectando el polímero a alta presión dentro de las cavidades del molde y manteniendo la presión con el martinete para compensar la contracción durante el enfriamiento y solidificación de la pieza; el tercer paso inicia mientras la pieza se enfría, el tornillo se retrae con la válvula de retención abierta para admitir el paso de nuevo material a la parte delantera del barril permitiendo la plastificación del mismo, finalmente se abre el molde para expulsar la pieza (Groover, 2007, p. 278).

Los equipos de inyección están constituidos por dos unidades, la unidad de inyección del plástico que consta de un barril, un tornillo que calienta, funde y mezcla el material, además el tornillo actúa como martinete llevando el material hacia adelante para inyectarlo al molde.

En cuanto a la unidad de sujeción esta cumple tres funciones, mantener los moldes alineados, mantener cerrado el molde durante la inyección, abrir y cerrar el molde (Groover, 2007, p. 277).

En la Figura 1.18 se muestra la unidad de inyección y la de sujeción o de abrazaderas.

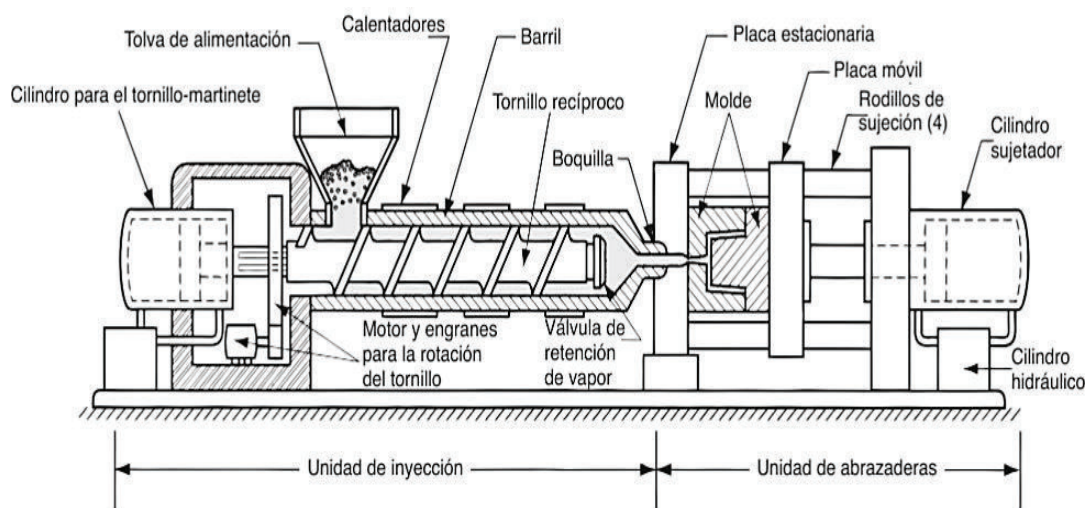


Figura 1.18. Diagrama de una máquina de moldeo por inyección
(Groover, 2007, p. 278)

Los defectos más comunes en el moldeo por inyección son los siguientes:

- **Rebabas:** Se produce cuando el material fundido se escurre entre las placas del molde, este defecto puede producirse por las siguientes razones: conductos del molde demasiado grandes, presión de inyección muy alta versus la fuerza de sujeción, temperatura de fusión elevada, tamaño excesivo de inyección o disparo (Groover, 2007, p. 283).
- **Marcas de hundimiento y vacío:** Estos defectos se producen en piezas de secciones gruesas ya que la superficie de la pieza se solidifica primero; sin embargo, hay contracción en el interior de la pieza generando marcas de hundimiento. Las marcas de vacío se producen por el mismo fenómeno pero se evidencia con zonas vacías en la pieza debido a las grandes fuerzas de tensión. Este defecto se elimina con la determinación correcta de la presión de mantenimiento, además el molde debe estar correctamente diseñado (Groover, 2007, p. 283).
- **Líneas de soldadura:** Se produce cuando el material fundido se encuentra desde direcciones opuestas, afecta a la pieza ya que esta zona presenta propiedades mecánicas inferiores comparadas con el resto de la pieza. Este defecto se reduce con mayores presiones de inyección, mayor temperatura de fundición del material o el rediseño del molde (Groover, 2007, p. 283).

1.2.4 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS POLÍMEROS

Las propiedades mecánicas de los materiales muestran el comportamiento de los materiales al ser sometidos a esfuerzos externos como: tracción, flexión, impacto, compresión, torsión; los parámetros a emplearse están diseñados y normados y proporcionan valores como el límite elástico, la resistencia a la ruptura, alargamiento, etc.

1.2.4.1 Resistencia a la tracción

El ensayo de tracción determina la resistencia del material a ser deformado; la probeta sujeta por los extremos a una barra móvil y otra fija, es sometida a un esfuerzo con una velocidad de alargamiento constante, mientras la celda de carga registra la fuerza y el extensiómetro mide el alargamiento de la muestra. Se determina el valor máximo que la probeta es capaz de resistir antes de que se produzca la ruptura. El estiramiento de la probeta antes de la ruptura permite establecer el grado de ductilidad del material (Barroso, Gil y Camacho , 2008, p. 317; Newel, 2010, p. 70).

El esfuerzo σ se mide con los datos de fuerza F y A_0 el área de la sección transversal inicial de la muestra, de acuerdo con la Ecuación [1.1].

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad [1.1]$$

La deformación ε se calcula a partir de la longitud inicial l_0 de la muestras hasta l que es la longitud de la muestra alargada conforme la Ecuación [1.2].

$$\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0} \quad [1.2]$$

En este ensayo los datos que se obtienen de la curva esfuerzo versus deformación son: módulo de elasticidad, límite elástico, resistencia a la tracción máxima y a la ruptura.

Las regiones de la curva de esfuerzo versus deformación que se muestra en la Figura 1.19 son tres, la primera corresponde a la deformación elástica, en esta zona el material puede regresar a su forma original sin daño permanente cuando se elimina la tensión sobre la muestra, la gráfica es una línea generalmente recta. La zona de deformación plástica corresponde a los puntos σ_y hasta σ_B en esta región el material al ser liberado de la tensión no retorna a su forma original pues

existen cambios permanentes en la microestructura, mientras el punto S_s corresponde al límite elástico. Finalmente se llega a la región de ruptura, cuando los materiales son frágiles estos se rompen inmediatamente después de pasar la deformación elástica (Newel, 2010, p. 74).

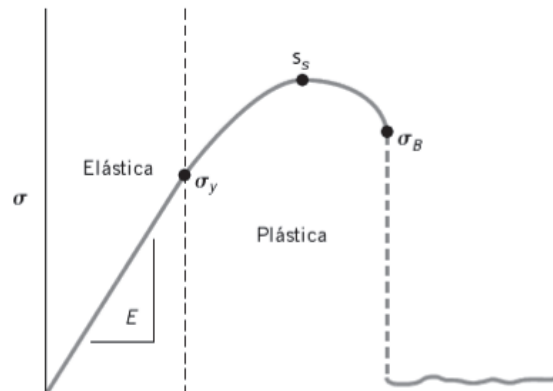


Figura 1.19. Curva representativa de esfuerzo versus deformación
(Newel, 2010, p. 74)

La Figura 1.20 muestra el comportamiento de un material frágil; la gráfica es lineal pues los materiales frágiles fallan al inicio de la deformación plástica, de tal manera que la resistencia a la tracción y la resistencia a la ruptura son las mismas.

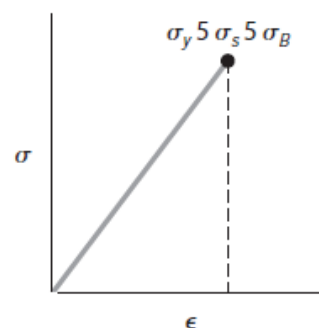


Figura 1.20. Curva esfuerzo versus deformación para un material frágil
(Newel, 2010, p. 75)

La tracción es uno de las propiedades que se ensaya con mayor frecuencia en los materiales compuestos reforzados con fibras naturales y materiales lignocelulósicos. La resistencia de la fibra cobra gran importancia al ser agregada

a matrices termoplásticas ya que su elevada capacidad de absorción de energía contribuye a mejorar las propiedades del material compuesto y delimita la aplicación en que será empleada (Miravete, 2012, p. 630).

Con la adición de agentes de acoplamiento a materiales reforzados con fibras hay cambios en el comportamiento frente a una carga y generalmente presentan mejores valores en la resistencia a la tracción (Jara, 2015, pp. 95-96).

Los materiales compuestos de fibra pueden mejorar las propiedades de tracción al modificar su superficie mediante tratamiento alcalino; un ejemplo es la adición de fibras de lino modificadas con lo que se aumentó seis veces el módulo de tracción (Bledzki, Sperber y Faruk, 2002, p. 12).

También se encuentran investigaciones con otras fibras como yute, sisal, coco, fibra de hoja de piña y bagazo donde se observó que la longitud y dirección de las fibras tiene influencia directa en la eficiencia del refuerzo respecto a la resistencia a la tracción (Barroso, Gil y Camacho , 2008, p. 682).

1.2.4.2 Resistencia a la flexión

Este ensayo se recomienda para materiales frágiles o muy frágiles pues estos tienen valores de deformación muy bajos o no soportan el ensayo de tracción y se rompen al ser sujetados por las abrazaderas. La resistencia a la flexión es la cantidad de esfuerzo capaz de resistir un material antes de romperse y permite evaluar el comportamiento del material sometido a dicha fuerza que genera una deformación. La parte inferior de la probeta experimenta una tensión a la tracción y la parte superior una tensión a la compresión (Newel, 2010, p. 80).

El ensayo se realiza por lo general en un sistema de tres puntos como se observa en la Figura 1.21 donde se aplica una fuerza de compresión F en la parte superior mientras los rodillos separados a una distancia L resisten la muestra. La resistencia a la flexión σ_F se define de acuerdo a la Ecuación [1.3] donde F_f es la

carga de la falla, L es la distancia entre los rodillos, w el ancho de la muestra, μ el grosor de la muestra.

$$\sigma_F = \frac{3F_f L^3}{2w\mu^2} \quad [1.3]$$

En cuanto al módulo de flexión E_f se calcula en la región elástica del material y se obtiene con la Ecuación [1.4] donde δ es la deflexión o deformación que sufre el material al ser doblado durante el ensayo

$$E_F = \frac{F_f \times L^3}{4w\mu^3 \delta} \quad [1.4]$$

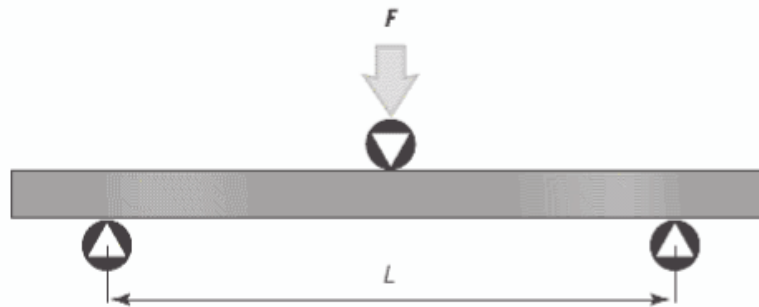


Figura 1.21. Esquema del ensayo de flexión en tres puntos
Fuente: Newel, 2010, p. 75

Los materiales compuestos fabricados con alta resistencia a la flexión, han sido ampliamente investigados para distintas fibras ya que algunas son capaces de resistir daños por impacto sin fractura de la matriz (Miravete, 2012, p. 649).

La resistencia a la flexión se ve influenciada por los parámetros de moldeo, tratamiento químico de las diferentes fibras, tipos de materiales lignocelulósicos empleados y humectación de la superficie. Un claro ejemplo es el tratamiento con silano de la fibra de yute con un aumento de hasta el 30 % en resistencia a la flexión (Miravete, 2012, p. 615).

2. PARTE EXPERIMENTAL

El presente trabajo de investigación tiene por objeto la caracterización química de los residuos de la elaboración de los botones de tagua; la muestra tomada corresponde a los residuos de la elaboración de botones de tagua de la empresa Artesanías Tatiana ubicada en la parroquia Andrade Marín de la ciudad de Atuntaqui de la provincia de Imbabura.

En la primera fase de estudio se caracterizan los residuos de tagua con el objetivo de conocer la composición química de dicho material para lo cual se sigue la metodología descrita en la Figura 2.1.

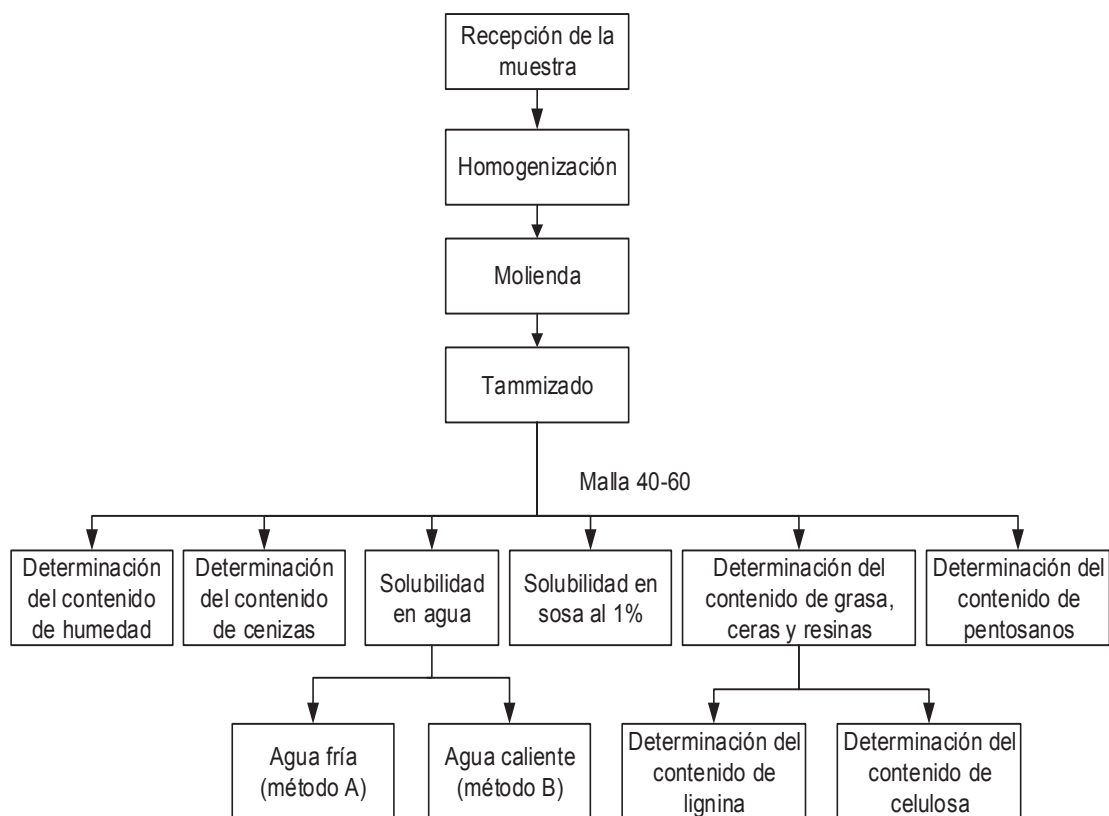


Figura 2.1 Esquema del proceso propuesto para la caracterización química de los residuos de tagua

Se receptaron los residuos de la elaboración de botones de tagua en las instalaciones del Centro Textil Politécnico y al observar variaciones de coloración

a simple vista se procedió a mezclarlo para obtener un material homogéneo que constituiría la materia prima de este proyecto. La materia prima fue reducida de tamaño en un molino de cuchillas marca THOMAS del Laboratorio de Operaciones Unitarias, se empleó una malla 0,5 mm.

Posterior al proceso de molienda el material fue tamizado con un juego de tamices de mallas 40, 60 y 80 cuyo tamaño nominal de la abertura es de 425 μm , 250 μm y 180 μm respectivamente. Además se seleccionó una muestra representativa tomada por el método de cuarteo simple del material molido y tamizado que se empleó para la caracterización química.

El procesamiento del material mediante extrusión se realizó inicialmente con poliestireno virgen y se determinó el perfil de temperatura y la velocidad de giro de los husillos del motor principal y de los rotores de la tolva de alimentación primaria. Al comprobar la factibilidad de uso de poliestireno se procedió a mezclarlo con el polvo de tagua ajustando las velocidades de giro de las tolvas de alimentación y del husillo del motor principal para obtener los pellets a diferentes composiciones de acuerdo al diseño experimental 3² propuesto.

Las probetas se elaboraron mediante inyección, se determinó el perfil de temperatura de inyección, la presión de inyección, el tiempo de inyección, la presión de mantenimiento, el tiempo de mantenimiento, la contrapresión en la plastificación y el tiempo del ciclo.

Por último se realizaron pruebas mecánicas de tracción y flexión, además se realizaron otras pruebas como: índice de fluidez con los pellets obtenidos mediante extrusión y termogravimetría para las probetas obtenidas mediante inyección.

Los resultados de los ensayos tanto para material obtenido como para el poliestireno virgen fueron comparados y se determinaron las mejores condiciones para la incorporación del polvo de tagua al poliestireno.

2.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS

2.1.1 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LOS RESIDUOS DE LA ELABORACIÓN DE LOS BOTONES DE TAGUA

Para la caracterización química de los residuos de la elaboración de botones de tagua se emplearon las normas TAPPI y ASTM que se detallan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Normas empleadas para la caracterización química de los residuos de la elaboración de botones de tagua

Análisis	Nombre de la norma	Norma
Contenido de humedad	<i>“Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measure of Wood and Wood Base Material”</i>	ASTM D4442-07
Contenido de cenizas	<i>“Standard Test Methods for Ash in wood”</i>	ASTM D1102-84 (2013)
Contenido de solubles en agua fría	<i>“Standard Test Methods for Water Solubility of Wood / Method A-Cold Water Solubility”</i>	ASTM D1110-84 (2013)
Contenido de solubles en agua caliente	<i>“Standard Test Methods for Water Solubility of Wood / Method B-Hot Water Solubility”</i>	ASTM D1110-84 (2013)
Contenido hemicelulosa	<i>“Standard Test Methods for 1% Sodium Hydroxide Solubility of Wood”</i>	ASTM D1109-84 (2013)
Contenido de grasas, ceras y resinas	<i>“Standard Test Methods for Ethanol-Toluene Solubility of Wood”</i>	ASTM D1107-96 (2013)
Contenido de celulosa	<i>“Cellulose in Wood”</i>	TAPPI T17 m-55
Contenido de lignina	<i>“Standard Test Methods for Acid-Insoluble Lignin in Wood”</i>	ASTM D1106-96 (2013)
Contenido de pentosanos	<i>“Pentosans in Wood”</i>	TAPPI T19 m-50

Para todos los ensayos se emplearon tamaños de partícula comprendidos entre 425 μm y 250 μm que corresponde al material que pasa la malla 40 y es retenido en la malla 60. Cada prueba fue realizada en paralelo y en base seca.

2.1.1.1 Determinación del contenido de humedad

Una vez realizado el proceso de cuarteo, molienda y tamizado, se determinó el contenido de humedad del polvo resultante. Para ello se utilizó una estufa marca Cobb en la cual se colocaron 2 gramos de muestra y su paralela por 2,5 horas a 105 °C; transcurrido el tiempo las muestras fueron retiradas y colocadas en un desecador hasta que se enfríen.

Finalmente se pesaron y el contenido de humedad se determinó mediante la Ecuación [2.1].

$$\% \text{ de Humedad} = \frac{\text{Masa inicial} - \text{Masa final}}{\text{Masa inicial}} * 100 \quad [2.1]$$

2.1.1.2 Determinación del contenido de cenizas

La determinación del contenido de cenizas se realizó en ensayo por triplicado mediante incineración directa a la llama de aproximadamente 10 gramos de muestra que fue colocada en crisoles previamente tarados.

Las muestras carbonizadas con un mechero fueron colocadas en una mufla marca VULCAN™ A-130, 1 100 °C, 50 °C, por 4 horas a 600 °C; completado el tiempo se sacaron las muestras y fueron colocadas en un desecador hasta ser enfriadas y pesadas. El porcentaje de cenizas se calculó con base en el peso anhidro de la muestra.

$$\% \text{ de cenizas} = \frac{\text{Masa final del crisol} - \text{Masa inicial del crisol}}{\text{Masa de la muestra inicial anhidra}} * 100 \quad [2.2]$$

2.1.1.3 Determinación del contenido de solubles en agua

Para la determinación del contenido de solubles en agua, se dispone de dos métodos, en agua caliente y en agua fría.

2.1.1.3.1 Método A – solubilidad en agua fría

La determinación del contenido de solubles en agua fría, evaluó el contenido de taninos, gomas solubles, azúcares y colorantes de la muestra. Se emplearon 2 gramos de muestra y su paralela, a las que se les añadieron 200 mL de agua destilada por 48 horas a 23 ± 2 °C, con agitación eventual.

Las muestras se filtraron en crisoles porosos previamente tarados y se secaron a 100 ± 5 °C por 4 horas. Posterior al secado se enfriaron en un desecador y se pesaron.

2.1.1.3.2 Método B – solubilidad en agua caliente

La determinación del contenido de solubles en agua caliente, evaluó el contenido de taninos, gomas solubles, azúcares, colorantes y además almidones de las muestras. Se emplearon 2 gramos de muestra y su paralela, estas se colocaron en balones de destilación, se añadieron 100 mL de agua destilada y se sometieron a reflujo por 3 horas. Luego las muestras se filtraron y lavaron con agua caliente en crisoles porosos previamente tarados, se secaron por un periodo 4 horas a 100 ± 5 °C. Finalmente se enfriaron en un desecador y se pesaron.

El porcentaje de solubles en agua fría y agua caliente se calcularon mediante la Ecuación [2.3] en base al peso anhidro de la muestra inicial.

$$\% \text{ de solubles en agua} = \frac{\text{Masa inicial del crisol} - \text{Masa final del crisol}}{\text{Masa de la muestra inicial anhidra}} * 100 \quad [2.3]$$

2.1.1.4 Determinación del contenido de hemicelulosa

Para la determinación del contenido de hemicelulosas se utilizaron 2 gramos de muestra anhidra y su paralela a las cuales se añadió 100 mL de solución de NaOH al 1 %, se sometieron a ebullición por 1 hora, agitándolas a los 10, 15 y 25 minutos. Las muestras fueron lavadas y filtradas en crisoles porosos previamente tarados, para el lavado se emplearon 50 mL de agua caliente, 50 mL de ácido acético y 50 mL de agua caliente. Se secaron en estufa por 4 horas a 100 ± 5 °C, se enfriaron en un desecador y por último se pesaron. El cálculo para el contenido de hemicelulosa se realizó con la Ecuación [2.4].

$$\% \text{ de hemicelulosa} = \frac{\text{Masa inicial} - \text{Masa final}}{\text{Masa de la muestra inicial anhidra}} * 100 \quad [2.4]$$

2.1.1.5 Determinación del contenido de grasas, ceras y resinas

La determinación de grasas, ceras y resinas se realizó mediante la extracción con solventes en un equipo soxhlet. Para este ensayo se emplearon 3 gramos de muestra y su paralela que se colocaron en timbles, mientras que en balones previamente tarados se colocaron 150 mL de una mezcla 67 % etanol y 33 % benceno, manteniéndose en reflujo por 8 horas. Se debe procurar una temperatura de 80 ± 5 °C lo que proporcionó de 4 a 6 sifonados por hora.

Trascurrido el tiempo de reflujo las muestras se sacaron y se dejaron secar a temperatura ambiente, mientras el solvente contenido en los balones se llevaron a un rotavapor para recuperarlo como destilado; el contenido de lípidos extraídos quedó en las paredes de los balones. Los balones fueron secados en estufa a 100 ± 5 °C por 3 horas para luego ser enfriados en un desecador y finalmente se pesaron. Los cálculos se realizaron con el peso inicial y final de los balones así como de la muestra inicial anhidra de acuerdo con la Ecuación [2.5].

$$\% \text{ de grasas, ceras y resinas} = \frac{\text{Masa inicial del balón} - \text{Masa final del balón}}{\text{Masa de la muestra inicial anhidra}} * 100 \quad [2.5]$$

2.1.1.6 Determinación del contenido de celulosa

La determinación del contenido de celulosa requirió el uso de la muestra en la que se eliminó el contenido de grasas, ceras y resinas, esta muestra debió ser lavada con solución de metanol para eliminar los residuos de benceno y luego ser secada a 80 ± 5 °C por un periodo de 3 horas, finalmente se enfrió en un desecador.

Se pesaron 2 gramos de muestra y su paralela, se les agregaron 50 mL de hipoclorito de sodio al 10 % con agitación magnética durante 8 horas, transcurrido el tiempo se filtraron en crisoles porosos previamente tarados, y se lavaron con 50 mL de agua, 50 mL de una solución de bióxido de azufre al 3 %, 50 mL de agua y 115 mL de sulfito de sodio al 2 %. Para el lavado con solución de sulfito de sodio se procedió primero a filtrar las muestras con 60 mL de dicha solución en porciones de 15 mL, luego las muestras se pasaron a vasos de precipitación de 250 mL con 15 mL de solución de sulfito y se dejaron reposar por 30 minutos en un baño de agua hirviendo.

Finalmente las muestras se filtraron en los mismos crisoles y se lavaron con 250 mL de agua caliente. Las muestras se secaron en estufa a 100 ± 5 °C por 3 horas, se dejaron enfriar y se pesaron. El contenido de celulosa se determinó con la Ecuación [2.6]

$$\% \text{ de celulosa} = \frac{\text{Masa inicial del crisol} - \text{Masa final del crisol}}{\text{Masa de muestra inicial anhidra, sin grasas, ceras y resinas}} * 100 \quad [2.6]$$

2.1.1.7 Determinación del contenido de lignina

El método aplicado para la determinación del contenido de lignina consistió en el empleo de muestra previamente tratada con la solución metanol-benceno para eliminar grasas, ceras y resinas; luego la muestra fue lavada y secada. Se utilizó 1 gramo de muestra anhidra, libre de lípidos y su paralela, a las que se les agregaron 15 ml de ácido sulfúrico al 72 %, y sometiéndolas a agitación

magnética por un periodo de 2 horas, a 18 °C. Transcurrido el tiempo requerido se trasladó la muestra y su paralela a balones de 1 000 mL, se agregaron 560 mL de agua y se sometieron a reflujo por 4 horas.

Luego de las cuatro horas se dejó enfriar y sedimentar, el contenido de los balones se filtró en crisoles porosos previamente tarados, y se lavaron con 500 mL de agua caliente. Las muestras se secaron en estufa a 100 ± 5 °C por 3 horas, luego se dejaron enfriar en un desecador y por último se pesaron. El cálculo del contenido de lignina se realizó mediante la Ecuación [2.7].

$$\% \text{ de lignina} = \frac{\text{Masa inicial del crisol} - \text{Masa final del crisol}}{\text{Masa de la muestra inicial anhidra}} * 100 \quad [2.7]$$

2.1.1.8 Determinación del contenido de pentosanos

Para este análisis se pesó 1 gramo de muestra anhidra y su paralela, se colocaron en balones a los cuales se les añadieron 100 mL de ácido clorhídrico 3,5 N, y se sometieron a ebullición; los destilados se recogieron a razón de 3 mL por minuto hasta alcanzar 300 mL. Los balones fueron acoplados con embudos de separación por los cuales se alimentaron la solución de ácido clorhídrico para mantener un volumen constante en los balones mientras se destilaban.

A los 300 mL de destilado se agregaron 250 gramos de hielo picado y 50 mL de agua; cuando el destilado se enfrió a 0 °C se adicionaron 20 mL de solución 0,2 N de bromuro-bromato y se agitaron por 5 minutos en erlenmeyers tapados, los gases producidos se liberaron con cuidado y se agregaron 10 mL de solución de yoduro de potasio al 10 % y unas gotas de almidón que actuaron como indicador. Finalmente las soluciones ya preparadas se titularon con solución de tiosulfato de sodio 0,1 N.

Para la preparación del blanco, se procedió con 270 mL de ácido clorhídrico y se agregaron 80 mL de agua, 20 mL de solución 0,2 N de bromuro-bromato, 10 mL de solución de yoduro de potasio al 10 % y unas gotas de almidón. Al igual que

con el destilado, se tituló con solución de tiosulfato de sodio 0,1 N; en ambos casos se midió el contenido de tiosulfato de sodio empleado y mediante la Ecuación [2.8] se calculó el contenido de pentosanos.

$$\% \text{ de pentosanos} = \frac{7.5 N (v_2 - v_1)}{W} - 1 \quad [2.8]$$

Donde:

N : normalidad de la solución de tiosulfato

v_1 : volumen de solución de tiosulfato usado para titular la muestra

v_2 : volumen de solución de tiosulfato usado para titular el blanco

W : peso de la muestra seca y corregida respecto al contenido de ceniza

1: factor de corrección por la formación de hidroximetil furfural

2.1.1.9 Análisis por espectroscopía infrarroja (FT-IR)

Realizado el proceso de cuarteo, molienda y tamizado de los residuos de tagua, el polvo resultante fue tratada en un espectrofotómetro Perkin Elmer modelo Spectrum One para determinar los grupos funcionales presentes en el polvo de tagua.

Para obtener los espectros se elaboró una pastilla con bromuro de potasio y el análisis se obtuvo con una resolución de 4 cm^{-1} , con 16 barridos en un rango comprendido entre 450 y 4000 cm^{-1} .

2.1.1.10 Análisis por termogravimetría (TGA)

Dentro de la caracterización química se realizó el análisis termogravimétrico de los residuos de tagua bajo la norma ASTM E1131-08 “*Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry*” con un equipo de termogravimetría SHIMADZU MODELO TGA-50 con una velocidad de calentamiento de 20 °C/min hasta alcanzar los 500 °C y un flujo de nitrógeno de 20 mL/min .

2.1.2 CARACTERIZACIÓN DEL POLIESTIRENO

En este estudio se utilizó poliestireno cristal de propósito general identificado como U249 de la marca UNIGEL Vocaça, comercializado en Ecuador por Nutec.

2.1.2.1 Análisis de índice de fluidez (MFI)

La determinación del índice de fluidez del poliestireno se realizó a 200 °C con una carga de 5 kg, de acuerdo a la norma ASTM D1238–10 “*Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer*”, con un medidor de índice de fluidez MF-20 (PM-09) marca CEAST.

2.1.2.2 Análisis térmico por calorimetría diferencial de Barrido (DSC)

La temperatura de transición vítrea del poliestireno fue determinada bajo la norma ASTM D3418-08 “*Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry*” en un calorímetro diferencial de barrido marca Netzsch modelo DSC 204- F1 Phoenix, 700 °C, 0,1 °C. La muestra fue sometida a un proceso de calentamiento continuo de 40 °C/min desde 27,8 °C hasta 150 °C, luego a un enfriamiento hasta los 40 °C y posterior a un segundo barrido con calentamiento hasta 150 °C y en seguida un enfriamiento hasta 60 °C. Se empleó una balanza Shimadzu modelo Libror AEL-40SM, 42 g, y celdas de aluminio de 25 µL.

2.1.2.3 Análisis por termogravimetría (TGA)

El poliestireno fue sometido a un análisis térmico bajo la norma ASTM E1131-08 “*Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry*” con un equipo de termogravimetría SHIMADZU MODELO TGA-50 con una velocidad de calentamiento de 20 °C/min hasta alcanzar los 500 °C y un flujo de nitrógeno de

50 mL/min. Este ensayo se realizó para determinar la temperatura de degradación del poliestireno.

2.1.2.4 Determinación de la densidad

La densidad del poliestireno se determinó bajo la norma ASTM D 792-08 “*Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement*”, este ensayo se realizó con una balanza analítica marca Denver Instrument Company modelo AA-200, 200g, 0,0001 g, además se empleó un equipo para la determinación de densidades marca METTLER-TOLEDO. Se realizaron tres mediciones con agua destilada como líquido de inmersión a una temperatura de trabajo de 19 °C. Para el cálculo de densidades se empleó la Ecuación [2.9].

$$\rho = \frac{A}{A-B} \times \rho_0 \quad [2.9]$$

Donde:

- ρ : densidad de la muestra
- A: peso de la muestra en el aire
- B: peso de la muestra sumergida en el líquido de inmersión
- ρ_0 : densidad del líquido de inmersión a la temperatura de trabajo

2.2 DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE PROCESAMIENTO POR EXTRUSIÓN DE LA MATRIZ DE POLIESTIRENO CON LOS RESIDUOS DE TAGUA.

Las condiciones de procesamiento para la extrusión del poliestireno a determinarse fueron: el perfil de temperatura, la velocidad de giro del husillo del motor principal y de los rotores de las tolvas de alimentación primaria y secundaria desde las cuales se alimentaron el poliestireno y polvo de tagua.

2.2.1 DETERMINACIÓN DEL PERFIL DE TEMPERATURA DE LA EXTRUSORA

El equipo empleado para la mezcla del polvo de tagua y la matriz de poliestireno fue una extrusora doble husillo co-rotante marca Jiangsu Xinda Science & Technology modelo CLAMSHELL PSHJ-35.

Se realizaron varias pruebas a fin de determinar el perfil de temperatura para el procesamiento de la matriz y el polvo de tagua, inicialmente se trabajó solo con poliestireno. Con base en los ensayos térmico y termogravimétrico realizados previamente se conoce la temperatura de transición vítrea y la temperatura de degradación del poliestireno, sobre la base de estos datos se consideró una variación de temperatura ascendente que permita fundir el material y que fluya sin mayor dificultad.

2.2.2 CALIBRACIÓN DE LAS TOLVAS DE ALIMENTACIÓN

Fijado el perfil de temperatura de extrusión se determinó el flujo de másico de la tolva de alimentación primaria y secundaria que contienen poliestireno y polvo de tagua.

Para calibrar las tolvas se elaboraron curvas de calibración de cada una de las tolvas, para la tolva de alimentación primaria que contenía poliestireno se obtuvieron flujos másicos a velocidades de giro de los rotores de 0 a 700 rpm y para la tolva secundaria se trabajó en un rango de 0 a 300 rpm; el tiempo para tomar la muestra de material entregado por las tovas fue de 1 minuto, en ambos casos y se empleó una balanza marca SHIMADZU modelo UW6200H para pesar el material entregado por las tolvas, se esperó procesar 1 kg/h de material.

También se determinó el tiempo de residencia del material en la extrusora para lo cual se varió la velocidad de giro del husillo; este valor se determinó con la adición de otro material que sirva como indicador.

2.3 EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE LAS PARTÍCULAS DE TAGUA A LA MATRIZ DE POLIESTIRENO.

2.3.1 DISEÑO EXPERIMENTAL

Para la determinación del diseño experimental a ser empleado en el desarrollo de este trabajo se estableció como factores experimentales el tamaño de partícula y el porcentaje de tagua presente en la matriz de poliestireno; para la determinación de los niveles de dichos factores se realizaron pruebas preliminares a fin de obtener como diseño experimental 3^k en el cual k representa los factores y tres son los niveles de cada factor.

- Los niveles del factor tamaño de partícula son:
 - Malla 40
 - Malla 60
 - Malla 80
- Los niveles del factor porcentaje de tagua en la matriz de poliestireno son:
 - 5 %
 - 10 %
 - 15 %

Con este diseño experimental se elaboraron las mezclas mediante extrusión sin replicas; luego se inyectaron los pellets obteniéndose las probetas que fueron sometidas a ensayos mecánicos de tracción y flexión como variables de salida.

Evaluación de la dispersión y distribución

Sobre la base del diseño experimental propuesto se realizaron nueve mezclas diferentes, las cuales fueron elaboradas en la extrusora doble husillo co-rotante a diferentes velocidades y con un perfil de temperatura determinado anteriormente. Se empleó una balanza SHIMADZU modelo UW6200H. A partir de las mezclas extruidas se elaboraron placas por moldeo a compresión con la prensa calefactora Carver modelo 212-2, 400 °C, 5 °C; 500 psi, 7 000 psi y con el empleo

de moldes tipo *flash* cuyas dimensiones se encuentran especificadas en el ANEXO I. Se trabajó a 140 °C y 4 000 psi. Las placas elaboradas se analizaron macroscópicamente, para lo cual se elaboró una cuadrícula de 5 x 5 de acuerdo con las dimensiones internas del molde (26 x 26 mm) y con un escáner SAMSUNG M2070 Series, se obtuvieron las imágenes para evaluar dispersión y distribución verificando la presencia de poliestireno y tagua en cada zona.

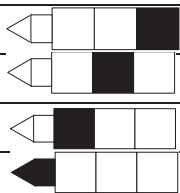
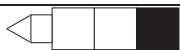



2.3.2 ELABORACIÓN DE PROBETAS MEDIANTE INYECCIÓN

Para la elaboración de las probetas mediante inyección se determinaron condiciones de operación que permitan obtener piezas de geometría definida, así como pesos y dimensiones similares. Para la elaboración de las probetas cuyas propiedades mecánicas serán analizadas se utilizó la inyectora BOY 30D y sus parámetros de funcionamiento se muestran en el ANEXO II.

2.3.2.1 Perfil de temperatura de inyección

El equipo cuenta con cuatro zonas de calentamiento, la temperatura de inyección es similar a la temperatura de extrusión; además con los datos del manual del fabricante de la inyectora BOY 30D, se sugiere para poliestireno emplear el perfil de temperatura que se muestra en la Tabla 2.2, a partir de estos datos y con los resultados de los ensayos termogravimétricos, tanto del poliestireno como de la tagua, se realizan pruebas para determinar el perfil de temperatura a emplearse.

Tabla 2.2. Perfil de temperatura de la inyectora BOY 30D para procesar poliestireno

Zonas de calentamiento		Perfil de temperatura (° C)
Zona de alimentación		180
Zona compresión		200
Zona dosificación		220
Boquilla		220

2.3.2.2 Presión de inyección y tiempo de inyección

La determinación de presión de inyección se realizó con la elaboración de piezas a diferentes presiones, desde 5 % de la presión específica de inyección hasta que se obtuvo una pieza completa y sin rebabas. Luego se elaboró una curva de calibración de peso en gramos versus el porcentaje de la presión específica de inyección, con esta curva se determinó el punto de conmutación al cual hay un llenado del 90 % al 95 % de la pieza. Las piezas se pesaron en una balanza SHIMADZU modelo UW6200H. Los valores de presión ensayados se encuentran en el ANEXO III.

2.3.2.3 Presión de mantenimiento y tiempo de mantenimiento

La presión de mantenimiento fue determinada luego de fijar la presión de inyección. Las piezas elaboradas a dicha presión de inyección que han llenado el 95 % de su capacidad fueron sometidas a una segunda presión que llenó la cavidad del molde; sin embargo, esta presión de mantenimiento no puede provocar efecto de rebabas por exceso de presión como se muestra en el ANEXO IV.

2.3.2.4 Contrapresión en la plastificación y tiempo del ciclo

La contrapresión en la plastificación se determinó entre el 45 y 55 % de la presión que se puede ejercer en la zona de plastificación. El tiempo del ciclo corresponde al tiempo de cierre del molde, tiempo de inyección, tiempo de mantenimiento, tiempo de plastificación y tiempo de abertura del molde, estos parámetros ya se establecieron anteriormente al fijarse las presiones; sin embargo, el tiempo de enfriamiento, fue el necesario para que la pieza sea expulsada sin complicaciones del molde.

2.3.3 EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA INCORPORACIÓN DE PARTÍCULAS DE TAGUA

La evaluación de las propiedades mecánicas de las probetas elaboradas mediante inyección se realizó bajo las normas ASTM D638-10 "*Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*" y ASTM D790-10 "*Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*", para tensión y flexión, respectivamente.

Las probetas de tracción se ensayaron en un equipo INSTRON, modelo 3365 con mordazas de ajuste manual y una celda de carga de 5 kN a una velocidad del ensayo de 50 mm/min. Para el ensayo de flexión fue necesario cortar las probetas inyectadas de acuerdo a las especificaciones que se encuentran en el ANEXO V, las probetas se ensayaron con mordazas de tres puntos a una velocidad de 2 mm/min. En ambos ensayos se utilizaron 5 probetas por cada una de las composiciones especificadas en el diseño experimental. Con los resultados obtenidos se realizó un análisis factorial con el programa Statgraphics CENTURION XVI.I.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Esta sección muestra los resultados de la caracterización química a los residuos de tagua y los ensayos realizados para determinar las condiciones de procesamiento por extrusión; así como para evaluar los efectos en las propiedades mecánicas de tracción y flexión, al incorporar partículas provenientes de residuos de la elaboración de botones de tagua a una matriz de poliestireno.

3.1 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LOS RESIDUOS DE LA ELABORACIÓN DE BOTONES DE TAGUA

La caracterización química de los residuos de botones de tagua se realizaron bajo la consideración de un material lignocelulósico; sin embargo, los resultados obtenidos no fueron los esperados, por lo que fue necesario el apoyo de otros análisis como espectroscopía infrarroja (FT-IR) y análisis por termogravimetría TGA con los que se pueda explicar los resultados obtenidos.

3.1.1 CONTENIDO DE CELULOSA, HEMICELULOSA Y LIGNINA

La Tabla 3.1 muestra los resultados obtenidos de la caracterización química de los residuos de botones de tagua.

Tabla 3.1. Resultados de la determinación del contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina del polvo de tagua

	Contenido de celulosa %	Contenido de hemicelulosa %	Contenido de lignina %
Promedio	50,68	34,48	1,35
Desviación estándar (n=2)	0,04	0,18	0,07

Los resultados obtenidos en la caracterización muestran que los componentes mayoritarios presentes en los residuos de los botones de tagua fueron: celulosa 50,68 % y hemicelulosa del 34,48 %, mientras 1,35 % fue el contenido de lignina. Los resultados del contenido de celulosa de la muestra de residuos de tagua concuerdan con el 50 % de celulosa que presentan Chávez-Sifontes y Domine (2013), (p. 16).

Mientras el contenido de hemicelulosas de la tagua coincide con el porcentaje de hemicelulosas de materiales lignocelulósicos afirmado por Suarez, Del Rio, y Bolaños (2010) cuyo porcentaje está entre 20 y 43 % (p. 4). Sin embargo, el porcentaje del contenido de lignina obtenido es bajo comparado con los que muestran en la Tabla 1.3 en la que se observa que el menor valor en muestras de origen vegetal es del 17 %.

Las maderas que son conocidas como maderas duras son las que presentan mayor contenido de lignina de hasta un 30 %. No obstante, a pesar que las semillas de tagua de la palma *Phytelephas aequatorialis macrocarpa* presentan alta dureza, el contenido de lignina es mínimo. Bajos contenidos de lignina se pueden encontrar en muestras no maderables con un contenido aproximado de 10 %; sin embargo, Sazanov y Gribanov (2010), afirman que en la determinación de lignina pueden existir interferencias de proteínas y ácidos hidroxinámicos responsables de los aromas de ciertas plantas (p. 178).

En el caso de la tagua puede existir dicha interferencia ya que al ser molida esta desprendió un ligero aroma. A pesar del mínimo contenido de lignina la dureza de la tagua puede ser explicada desde la perspectiva de la fisiología vegetal, ya que las hemicelulosas, básicamente pentosas y hexosas como la manosa y el ácido galacturónico, pueden formar enlaces con la lignina y la celulosa con la fuerza de un enlace covalente en la estructura de las paredes celulares (Martinez y Silva, 2015, p. 142).

Martinez y Silva (2015), menciona que la lignina cumple una función microbiana y por el mínimo contenido de lignina que tiene la tagua, esta presenta alta

predisposición a sufrir descomposición por ataque de hongos; dicha vulnerabilidad se corroboró con el ensayo de solubilidad en sosa al 1 %; los resultados de este ensayo son reportados como contenido de hemicelulosas (p. 142). Además mediante observaciones realizadas en pruebas preliminares se apreció cambio en la coloración y olor en las muestras tratadas con agua destilada por 72 horas.

3.1.2 CONTENIDO DE COMPONENTES MINORITARIOS

Contenido de pentosanos y grasas ceras y resinas

Los resultados de la Tabla 3.2 muestra el contenido de pentosanos en la muestra de 6,64 % y de grasas, ceras y resinas de 1,73 % este último se encuentra dentro de los valores esperados conforme los valores de la composición química de la madera reportados en la Tabla 1.4 con un porcentaje de extractivos alrededor de un 5 %, cabe mencionar que estos polímeros cerosos limitan el efecto de la degradación en la muestras; mientras el contenido de pentosanos se relaciona con el contenido de hemicelulosas ya que son un tipo de hemicelulosas estructurales como lo muestra la Figura 1.7.

Tabla 3.2. Resultados de la determinación del contenido de pentosanos, grasas, ceras y resinas del polvo de tagua

	Contenido de pentosanos %	Contenido de grasas, ceras y resinas %
Promedio	6,64	1,73
Desviación estándar (n=2)	0,27	0,14

3.1.3 CONTENIDO DE SOLUBLES EN AGUA CALIENTE Y AGUA FRÍA

Los resultados del contenido de solubles agua se muestran en la Tabla 3.3. Los valores alcanzados fueron 6,53 % de solubilidad en agua caliente y 8,43 % en

agua fría. Se esperaba que los valores obtenidos en solubilidad de agua caliente sean mayor a los obtenidos en solubilidad en agua fría; sin embargo, en este ensayo hay dos parámetros que difirieron en cada análisis, estos fueron la temperatura y el tiempo de exposición, ya que para el ensayo en agua caliente se mantuvo la muestra en reflujo por 3 horas mientras el ensayo en agua fría mantuvo la muestra por 48 horas, lo que pudo provocar la descomposición de ciertos componentes adicionales como las hemicelulosas de bajo peso molecular.

Además de las variables como el tiempo de exposición también es posible que se presenten este tipo de resultados en los que la mayor cantidad de solubles se encuentran en agua fría, y no en agua caliente, estos valores son justificados considerando el tipo de madera, la edad y las condiciones de crecimiento de la planta así como el lugar del cual se tome la muestra (Rutiaga, Weiderpass, y Strobel, 2000, p. 76).

Tabla 3.3. Resultados de la determinación del contenido de solubles en agua fría y caliente del polvo de tagua

	Cantidad de solubles en agua caliente %	Cantidad de solubles en agua fría %
Promedio	6,53	8,43
Desviación estándar (n=2)	0,04	1,31

Para determinar si el tiempo influyó en los resultados obtenidos se ensayaron muestras paralelas tanto para solubilidad en agua fría como en agua caliente manteniendo la variable tiempo en 6 horas para los dos ensayos. Los resultados de estos ensayos se encuentran en la Tabla 3.4, los valores muestran que la solubilidad en agua caliente es mayor que en agua fría, estos resultados se deben al mayor tiempo de exposición de la muestra en agua y por el bajo contenido de grasas y ceras que actúan como agentes protectores de degradación además de la susceptibilidad de la muestra al ataque por hongos. Por otra parte con 34,48 %

de hemicelulosas en las muestras y el reporte de Pratyosh y Brett (2012) afirma que las hemicelulosas encontradas en el endospermo de la tagua son en su mayoría son mananos, cuya estructura presenta afinidad a los solventes polares (p. 43). Rutiaga, Weiderpass, y Strobel (2000) establecen que estas hemicelulosas presentan mayor solubilidad en agua fría que en agua caliente (p. 77). Por lo tanto se justifican los resultados de la Tabla 3.3.

Tabla 3.4. Resultados de la determinación del contenido de solubles en agua fría y caliente del polvo de tagua con 6 horas de ensayo

	Cantidad de solubles en agua caliente ($t = 6h$) %	Cantidad de solubles en agua fría ($t = 6h$) %
Promedio	5,8	4,5
Desviación estándar ($n=2$)	0,49	0,28

3.1.4 CONTENIDO DE HUMEDAD Y CENIZAS

En la Tabla 3.5 muestra los resultados del contenido de humedad y cenizas de la muestra de polvo de tagua. El porcentaje de humedad presente en los residuos de tagua fue 8,44 % y 1,16 % para las cenizas, estos valores son similares a los reportados por Salazar (2006), en los cuales muestra un contenido de humedad de 8,9 % y 1,39 % de cenizas (p. 75). Los valores tanto de humedad como de cenizas de esta muestra fueron los esperados en una muestra lignocelulósica.

Tabla 3.5. Resultados de la determinación de humedad y cenizas del polvo de tagua

	Cantidad de humedad %	Cantidad de Cenizas %
Promedio	8,44	1,16
Desviación estándar ($n=3$)	0,03	0,16

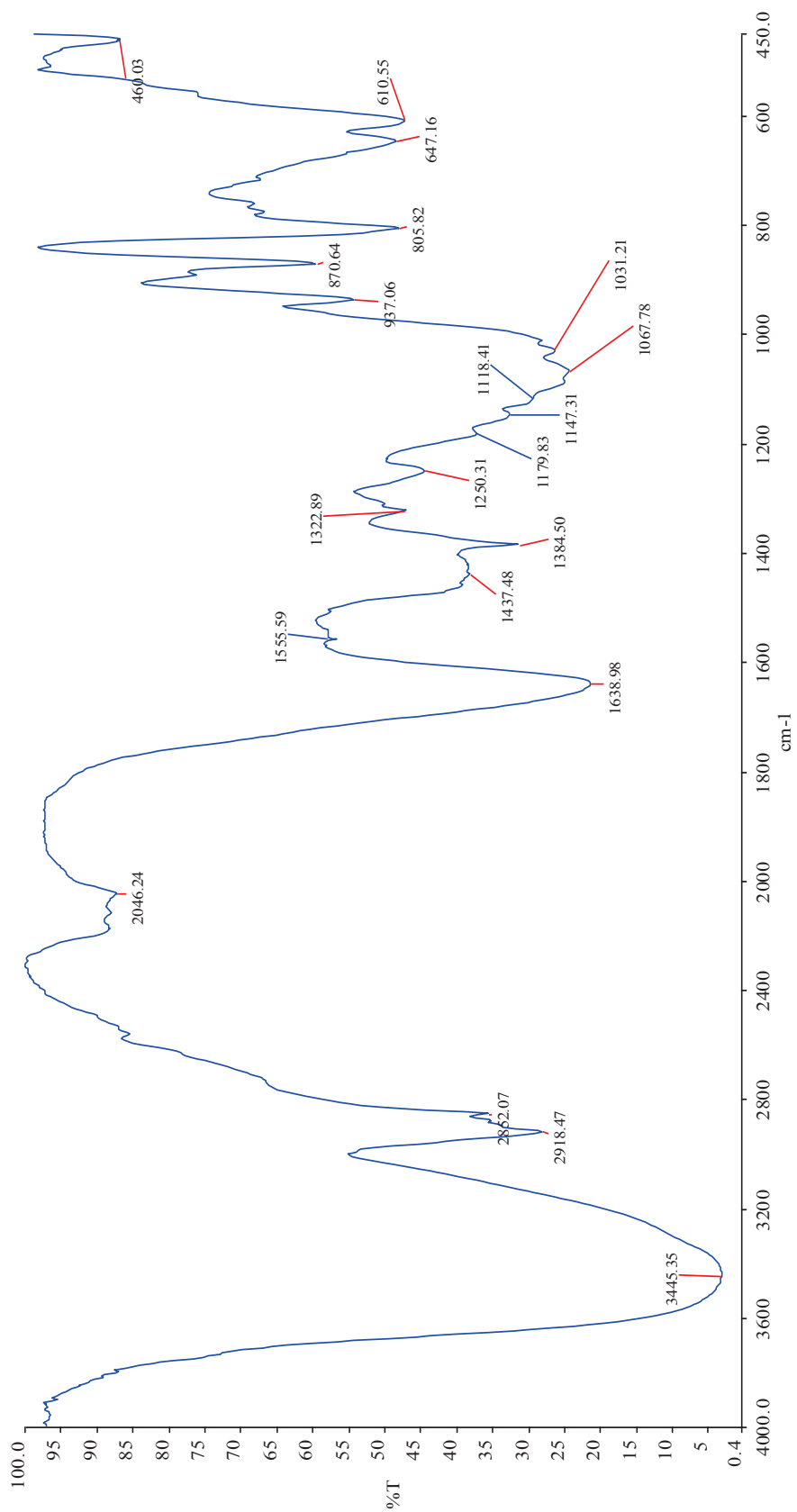
3.1.5 ANÁLISIS DE ESPECTROSCOPIA FT-IR

El análisis por espectroscopía FT-IR determinó los principales grupos funcionales presentes en la muestra. Además se comparó el espectro obtenido con los espectros de celulosa y lignina disponibles en la base de datos del equipo. Los espectros superpuestos tanto para la muestra original como para el espectro de la muestra de celulosa obtenida después de ser tratada bajo la norma TAPPI T17 m-55 se encuentran en el ANEXO VI. En el espectro obtenido de la muestra molida y tamizada en malla 40 y retenida en malla 60 se observa que las bandas más prominentes son las que se detallan en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Grupos funcionales presentes en el espectro FT-IR de los residuos de tagua

Número de onda (cm^{-1})	Grupos funcionales	Compuestos
2990-2885	$C - H_n$	Grupos alquilo
1485-1415		
3540-3200	$O - H$	Grupos hidroxilo
1205-885	$N - H$	Grupos amino
1150-1110	$C - O - C$	Grupos éter alifático
1085-1040	$C - O - (H)$	

La Figura 3.1 muestra el espectro del polvo de tagua y las bandas presentes en la misma. La muestra exhibió la presencia de grupos hidroxilo en dos regiones, 3540 a 3200 cm^{-1} y 1205 a 885 cm^{-1} , esto por la capacidad hidrofílica de la muestra, ya que los grupos hidroxilo presentes en las estructuras de la celulosa, hemicelulosa y lignina provocan una tendencia a captar humedad; con base en los datos proporcionados por Saldarriaga, Zuluaga, Álvarez y Gañan (2007), esta zona denota la presencia de manosa, además las vibraciones que están alrededor de 872 cm^{-1} revelaron la existencia de unidades D-manopirosa y las vibraciones de 1250 cm^{-1} corresponden a la presencia de pectinas (p. 9).



— DC OTI0061-2016 tagua rev.sp - 20/02/2016

Figura 3.1. Espectro FT-IR del polvo de tagua molido y tamizado en malla 40 y retenido en malla

Las bandas asociadas a la presencia de celulosa se encuentran en 1437, 1384, 1322 cm^{-1} corresponden a las vibraciones del grupo $C - H_n$; 1250, 1179, 1140, 1118 cm^{-1} se debe a las vibraciones del grupo $C - O - C$; y 1067 cm^{-1} pertenece a las vibraciones del grupo $C - O$. Mientras las vibraciones de 937 y 870 cm^{-1} corresponden a las uniones β de la celulosa y manosa.

3.1.6 ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO TGA

El resultado del análisis termogravimétrico realizado a la muestra de los residuos de tagua se muestra en Figura 3.2. La curva obtenida muestra un perfil típico de pérdida de peso de la muestra en diferentes etapas para un material orgánico. La primera zona de pérdida de peso inició a 22,64 °C y terminó a 186,43 °C con un porcentaje de 9,58 %. Esta primera pérdida de peso corresponde a la humedad presente en el material, ya que al comparar el porcentaje de humedad determinado en la caracterización química de la tagua y el obtenido por este análisis hay una diferencia entre los dos porcentajes de 1,04 %.

La segunda zona de pérdida de peso inició a 187,43 °C y terminó a 358,73 °C, la variación del peso fue del 53,94 % en esta zona se presume la degradación de la mayoría de los componentes correspondientes a hemicelulosas y también a las cadenas de celulosa de menor peso molecular presentes en los residuos de polvo de tagua.

De acuerdo con la investigación de Haiping et al. (2007), la descomposición de las hemicelulosas se encuentra en un rango de temperaturas de 220 °C y 325 °C, mientras la pirólisis de la celulosa ocurre a un rango de temperatura de 315 °C a 400 °C y la lignina por su variada estructura puede descomponerse en un amplio rango de temperaturas, desde la temperatura ambiente hasta alcanzar los 900 °C (p. 1 784).

Finalmente la tercera zona la pérdida de peso inició desde 358,73 °C hasta 798,46 °C, con un porcentaje de pérdida de peso de 12,65 %, en esta zona se

esperó la pérdida de peso por la degradación de las cadenas de celulosa de mayor peso molecular que están unidas a la estructura de lignina presente en la muestra aunque en mínimas cantidades; ya que la lignina se caracteriza por dar estabilidad térmica a las muestras que la contengan.

La estructura de cada uno de los componentes que fueron determinados inicialmente y que están presentes en el polvo de tagua son los que posibilitaron estos comportamientos térmicos. Las hemicelulosas cuya estructura es bastante ramificada con la presencia de varios sacáridos, es fácil de degradar a bajas temperaturas; mientras la celulosa al ser un polímero de estructura lineal e incluso cristalina presenta una mayor estabilidad térmica.

La lignina cuya estructura presenta anillos aromáticos con diferentes enlaces en su estructura establece un amplio rango de temperatura en la que sus enlaces se van rompiendo gradualmente (Haiping, Rong, Hanping, Dong Ho y Chuguang, 2007, p. 1782).

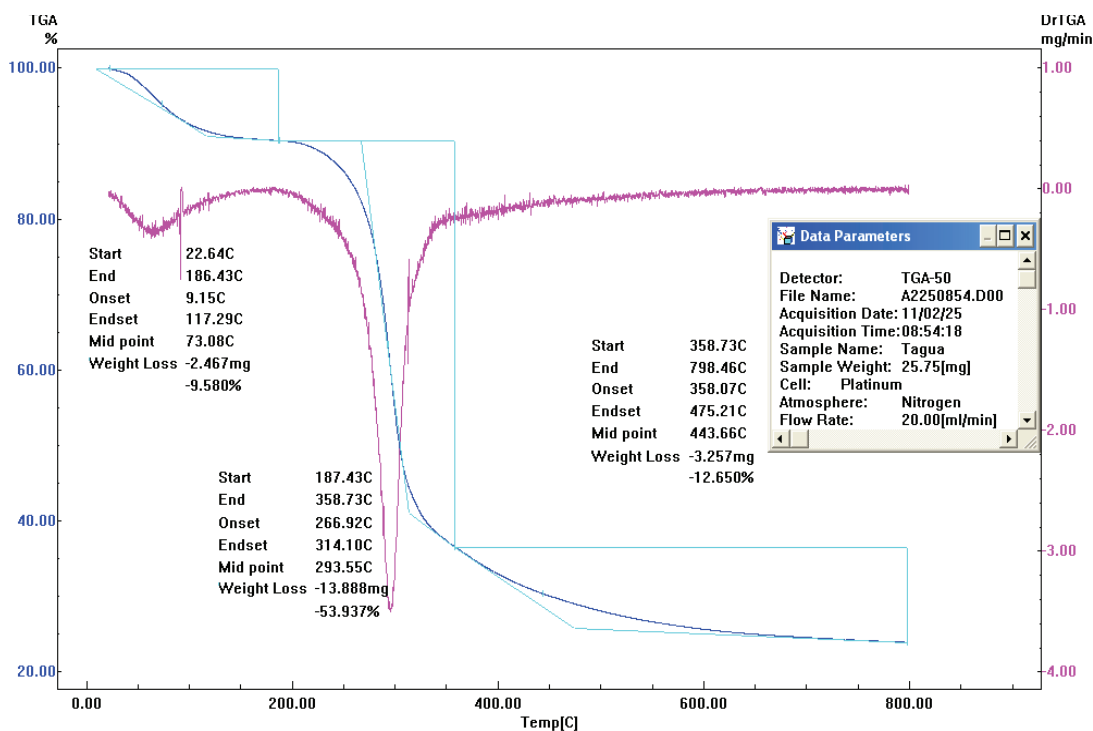


Figura 3.2. Curva de análisis TGA al polvo de tagua molido y tamizado en malla 40 y retenido en malla 60

3.2 CARACTERIZACIÓN DEL POLIESTIRENO

3.2.1 ÍNDICE DE FLUIDEZ

En la Tabla 3.7 se muestran los resultados del índice de fluidez. Para la determinación del índice de fluidez del poliestireno, se realizaron tres ensayos y el promedio de estos valores se comparó con los valores de la hoja de especificaciones técnicas que se encuentra en el ANEXO VII.

Tabla 3.7. Índice de fluidez del poliestireno virgen realizado a 200 °C y 5 kg con calentamiento de 100 segundos.

	Índice de Fluidez (g/10min)	Índice de fluidez (hoja técnica) (g/10min)
Promedio	18,56	19
Desviación estándar (n=3)	0,73	-

Al comparar los valores obtenidos en el laboratorio y los de la hoja técnica se observa que no hay variación significativa entre estos valores. El valor de índice de fluidez del poliestireno de 18,56 g/10 min es un valor alto, lo que significa que fluyó sin mayor dificultad en el procesamiento tanto en extrusión como en inyección (Brieva, 2011, p. 26).

3.2.2 ANÁLISIS POR CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO DSC

El análisis DSC realizado al poliestireno muestra las transiciones térmicas que sufre el polímero al ser calentado, la transición energética endotérmica corresponde a la cantidad de calor suministrado para un cambio de estado de la muestra.

La curva obtenida en el segundo proceso de calentamiento, se muestra en la Figura 3.3. Con esta curva se determinó la temperatura de transición vítrea (T_g)

del poliestireno Unigel U249 la cual es de 100,9 °C. Este valor de Tg está dentro de los valores reportados por (Brieva, 2011, p. 10). Además este valor de temperatura fue empleado para determinar el perfil de temperatura para el proceso de extrusión ya que el material debe ser receptado en la primera zona de alimentación antes de que empiece a reblandecerse para que pueda ser transportado sin dificultad.

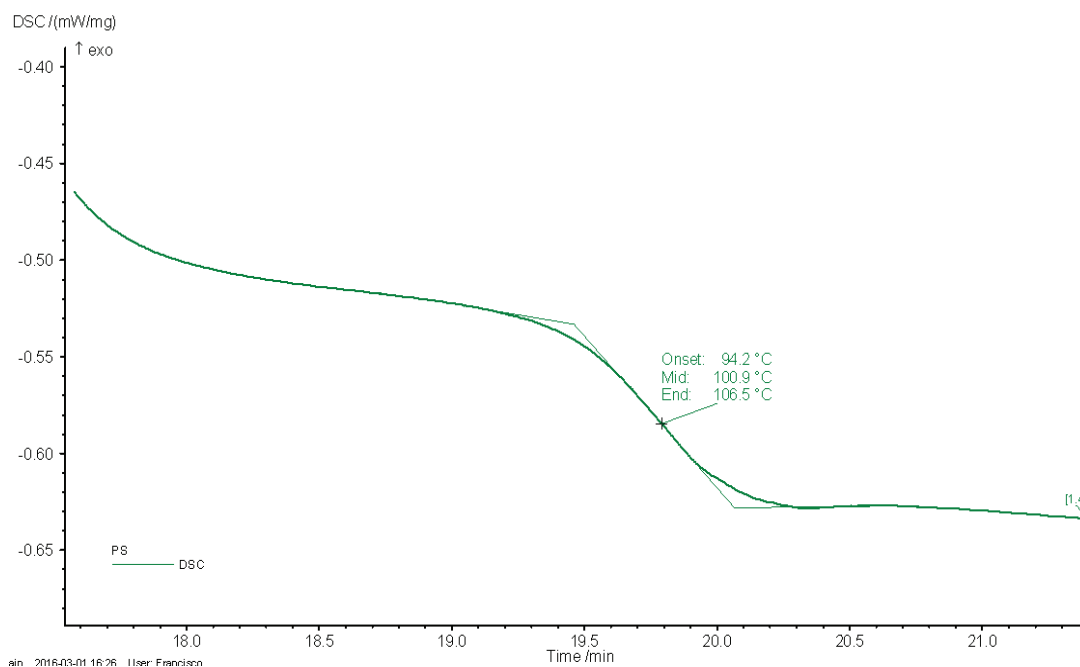


Figura 3.3. Termograma obtenido en el análisis térmico DSC, en el segundo proceso de calentamiento para determinar la temperatura de transición vítrea del poliestireno

3.2.3 ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO TGA

La estabilidad térmica del poliestireno se estudió mediante termogravimetría TGA. La Figura 3.4 muestra la curva obtenida en el ensayo. Existe una pérdida de peso de la muestra en una sola etapa que inicia a los 235 °C y termina a los 485 °C. A esta temperatura existió una pérdida de peso de 99,7 % del peso inicial. Con estos valores se pudo inferir que la temperatura máxima de trabajo para el poliestireno en este estudio es de 235 °C, ya que a mayor temperatura existe ruptura de las cadenas que conforman este polímero haciendo que se degrade.

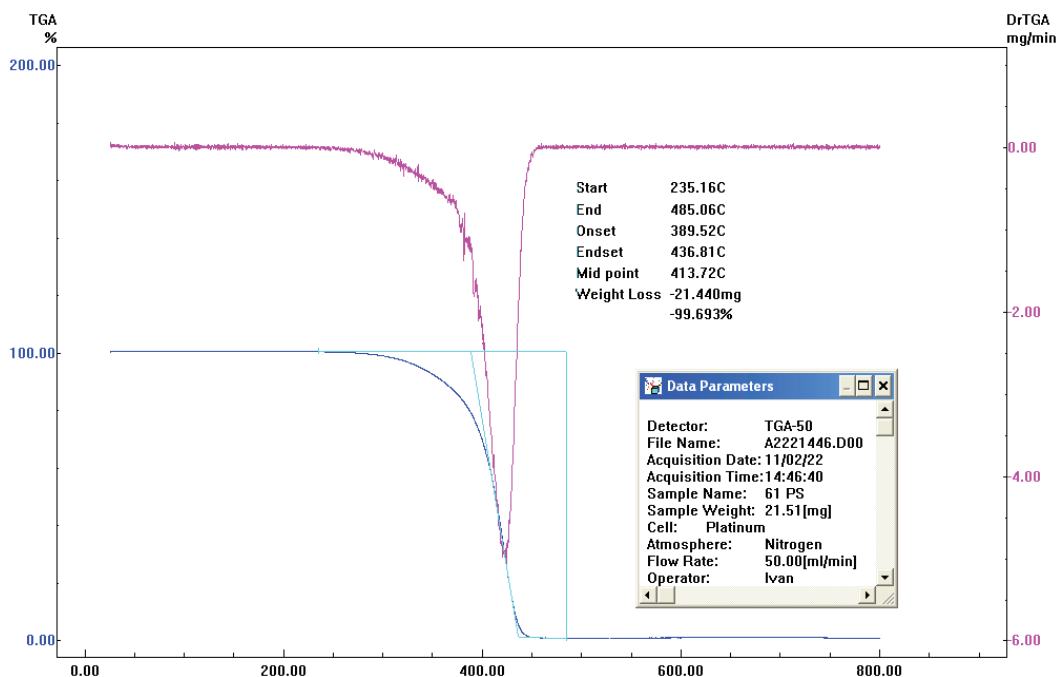


Figura 3.4. Termograma obtenido en el análisis térmico TGA de poliestireno virgen realizado bajo atmosfera de nitrógeno hasta la temperatura de 800 °C.

3.2.4 DETERMINACIÓN DE DENSIDAD

En la Tabla 3.8 se observan los valores de densidad obtenidos y el correspondiente a la hoja técnica del poliestireno Unigel U249. Para la determinación de la densidad se realizaron tres ensayos, los ejemplos de cálculo y la tabla de valores de densidad en función de temperatura se encuentran en el ANEXO VIII.

Tabla 3.8. Resultados de densidad realizados por inmersión de la muestra de poliestireno en un baño de agua

	Densidad (g/cm^3)	Densidad (hoja técnica) (g/cm^3)
Promedio	1,05	1,04
Desviación estándar (n=3)	0,01	-

Los valores de densidad obtenidos en el laboratorio corroboran los valores de densidad de la hoja técnica del poliestireno cristal de propósito general U249 de la marca UNIGEL.

3.3 CONDICIONES DE PROCESAMIENTO POR EXTRUSIÓN DE LA MATRIZ DE POLIESTIRENO CON LOS RESIDUOS DE TAGUA

Los resultados de las condiciones de procesamiento de la extrusora doble husillo co-rotante Jiangsu Xinda Science & Technology se muestran a continuación.

3.3.1 PERFIL DE TEMPERATURA DE LA EXTRUSORA

Para determinar el perfil de temperatura que se empleó en el procesamiento del poliestireno se realizaron varias pruebas en las que se cambió la temperatura desde los 70 °C hasta los 200 °C.

Los perfiles de temperatura probados se encuentran en el ANEXO IX. El equipo cuenta con 7 zonas de calentamiento; sin embargo, la tercera zona presentó problemas en el calentamiento por lo que se optó por aumentar la temperatura de la zona 2 y 3 ya que el torque provocado para el transporte del poliestireno desde la zona de alimentación hasta la boquilla superaba el 60 %, lo que encendía el paro de emergencia de la máquina.

En la Tabla 3.9 se muestran dos perfiles de temperaturas, esto se debió a que al determinar el perfil de temperatura de trabajo solo para poliestireno no se consideró la estabilidad térmica de la tagua y al agregar el polvo de tagua este presentó un evidente cambio de coloración que denotó degradación del mismo como se observa en la Figura 3.5. Por estos resultados se optó por disminuir las temperaturas del perfil de temperatura de la extrusión; sin embargo, se observó

macroscópicamente que la tagua por su inestabilidad térmica mantenía cierto grado de degradación.

Finalmente se resolvió alimentar el polvo de tagua por la cuarta zona para disminuir el tiempo de residencia dentro de la extrusora y minimizar la degradación de la misma.

Tabla 3.9. Perfil de temperatura empleado en el procesamiento de poliestireno y poliestireno con polvo de tagua

Zonas de calentamiento de la extrusora	Perfil de temperatura solo poliestireno (°C)	Perfil de temperatura con adición del polvo de tagua (°C)
Zona 1	110	100
Zona 2	140	150
Zona 3	146*	146*
Zona 4	170	170
Zona 5	185	180
Zona 6	200	190
Zona 7	200	190

* Temperatura máxima alcanzada en la zona 3



Figura 3.5. Fotografías de poliestireno extruido con polvo de tagua: a) poliestireno y polvo de tagua degradados, b) muestras de poliestireno con polvo de tagua degradados a varias temperaturas, c) poliestireno y polvo de tagua a las condiciones de temperatura definidas para su procesamiento

3.3.2 CALIBRACIÓN DE LAS TOLVAS DE ALIMENTACIÓN

3.3.2.1 Calibración de la tolva de alimentación primaria

La calibración de las tolvas de alimentación primaria y secundaria se realizó tanto para el poliestireno como para los diferentes tamaños de partícula del polvo de tagua.

En la Figura 3.6 se muestra la curva de calibración de la tolva de alimentación primaria, que se realizó desde 0 a 800 rpm y se obtuvo una línea de tendencia con un factor de determinación múltiple R^2 de 0,925, es decir existe un 92,5 % de la varianza por lo que la línea de tendencia de regresión ajustada se acerca bastante a los obtenidos experimentalmente. Esta variación se produjo porque el poliestireno presentó dificultades para ser alimentado, debido al modelo del dosificador de la extrusora, ya que este equipo está diseñado para trabajar con poliolefinas, por ende el tamaño de los pellets y la dureza del poliestireno provocaron que los tornillos sin fin del dosificador se atasquen.

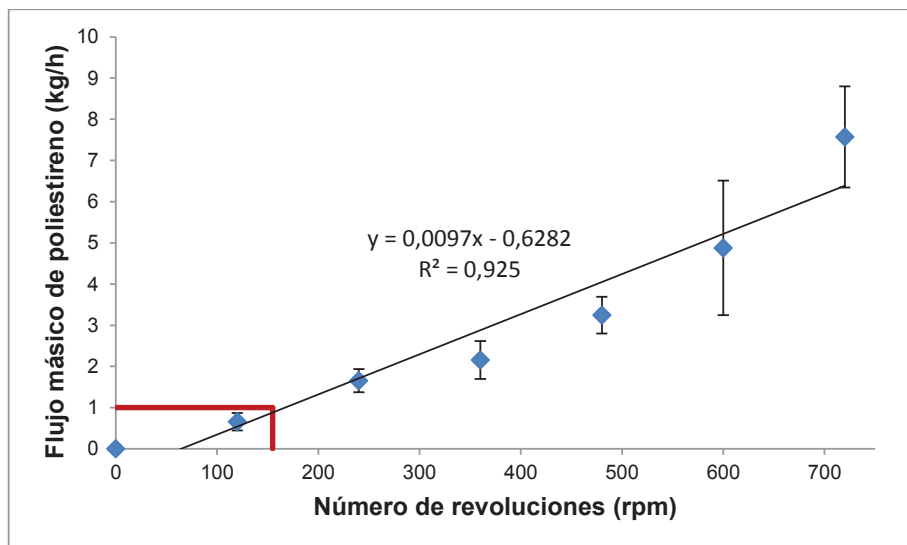


Figura 3.6. Curva de calibración de la tolva principal de la extrusora doble husillo co-rotante CLAMSHELL PSHJ-35 para alimentar poliestireno

Para la extrusión de 1 kg/h de poliestireno y polvo de tagua se determinó que el número de revoluciones necesarias fue de 155 rpm lo que equivale a 2,6 Hz.

3.3.2.2 Calibración de la tolva de alimentación secundaria

La Figura 3.7 corresponde a las curvas de calibración de tagua para los tres tamaños de partícula 425, 250 y 180 μm correspondientes a las malla 40, 60 y 80 respectivamente que fueron adicionados a la tolva secundaria para alimentar a la extrusora.

Como se observa en el gráfico hasta aproximadamente 100 rpm no hay una diferencia marcada entre las tres curvas correspondientes a los diferentes tamaños de partícula del polvo de tagua alimentado. A partir de 100 rpm hay una variación del flujo másico para el tamaño de partícula de 425 μm ; pero para el tamaño de partícula de 250 y 180 μm se mantiene la misma tendencia

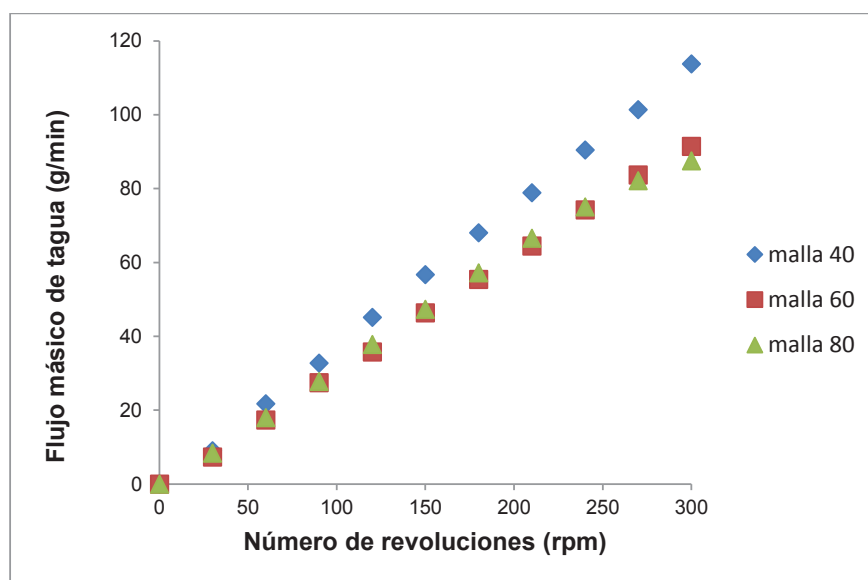


Figura 3.7. Curva de calibración del flujo másico de tagua versus el número de revoluciones del rotor de la tolva de alimentación secundaria.

Los valores de los factores de determinación múltiple para todas las mallas son de 0,99, lo que indica que los valores ajustados son similares a los valores de experimentación. Se fijó 1 kg como flujo másico de material para la extrusión y a partir de este valor y con base en los datos de las curvas de calibración se determinó el número de revoluciones necesarias para adicionar el polvo de tagua a las diferentes composiciones, estos valores se muestran en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10. Valores de rpm y Hz para obtener el flujo másico del polvo de tagua necesario para cada una de las mezclas fijadas en el diseño experimental

Porcentaje de tagua agregada a la matriz (%)	Flujo másico requerido (g/min)	rpm	Frecuencia (Hz)
5	0,88	3,0	0,05
10	1,85	6,2	0,11
15	2,94	9,8	0,17

El porcentaje de tagua a ser agregado a la matriz es pequeño comparado con otros porcentajes en los que se agrega hasta un 40 % de refuerzo o carga de materiales lignocelulósicos a matrices termoplásticas (Miravete, 2012, p. 7).

En esta investigación el porcentaje máximo de 15 % de polvo de tagua a ser agregado a la matriz se determinó en los ensayos preliminares, ya que se presentaron problemas de procesamiento cuando se intentó agregar mayor porcentaje de polvo de tagua a la matriz; los problemas fueron: no poder obtener un producto de forma continua, y fracturas del fundido, este defecto se debe al esfuerzo cortante producido por el husillo al añadir la carga a la matriz y el choque contra la camisa de la extrusora (Groover, 2007, p. 270). Para evitar estos defectos se propuso aumentar la temperatura de fundido y disminuir la velocidad de giro del husillo; sin embargo, estos parámetros no se pudieron modificar, ya que la falta de estabilidad térmica de la tagua no permitió aumentar el tiempo de residencia dentro del husillo o aumentar el perfil de temperatura, ya que puede degradar tanto a la carga como la matriz.

Tanto el flujo de alimentación del poliestireno como del polvo de tagua fueron determinados y fijados en el equipo; sin embargo, no se pudo obtener un material homogéneo por las dificultades que se presentaron para manipular las bajas revoluciones que se requerían para la adición del polvo de tagua, esto conjuntamente con el problema de alimentación del poliestireno, requirió que tanto la matriz como el polvo de tagua sean previamente pesados para garantizar las composiciones de las mezclas.

3.3.3 TIEMPO DE RESIDENCIA

Los valores de tiempo de residencia para cada zona de la extrusora se encuentran en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11. Resultados del tiempo de residencia del poliestireno y el polvo de tagua hasta la cuarta zona, sexta zona y la boquilla de la extrusora

rpm	Hz	Zona	Tiempo de residencia del poliestireno (min)	Tiempo de residencia de la tagua (min)
60	1	Zona 4	6	---
		Zona 6	6	6
		Boquilla	5	5
		Total	17	11
120	2	Zona 4	5	---
		Zona 6	5	5
		Boquilla	4	4
		Total	14	9
180	3	Zona 4	4	---
		Zona 6	4	4
		Boquilla	3	3
		Total	11	7
240	4	Zona 4	3	---
		Zona 6	3	3
		Boquilla	2	2
		Total	8	5

Los tiempos de residencia del material dentro de la extrusora fueron registrados en la cuarta zona, sexta zona y también a la salida del extruido en la boquilla. La cuarta y sexta zona fueron seleccionadas ya que el equipo puede ser adaptado

para la extracción de gases por vacío en estas zonas lo que permite observar el material al pasar.

Como se indicó anteriormente se requirió de 2,6 Hz o 155 rpm para la obtención de 1 kg de material extruido, por lo que el tiempo de residencia del poliestireno fue de 9 minutos y de la tagua de 6 minutos. Se procuró disminuir el tiempo de residencia de la tagua dentro del husillo, ya que al no poseer buena estabilidad térmica esta se degradaba con facilidad. Se eligió la cuarta zona para la adición del polvo de tagua ya que aún quedaba distancia antes de que el extruido salga por la boquilla y pueda mezclarse el polvo de tagua y el poliestireno. Esto no pudo realizarse en la sexta zona pues esta se encontraba muy cerca de la boquilla y no permitió la mezcla homogénea del polvo de tagua y el poliestireno.

3.3.4 ENFRIAMIENTO Y PELETIZADO

Por las características de baja resistencia al impacto, poca ductilidad y escasa flexibilidad, el poliestireno extruido no pudo ser enfriado mediante contacto con un baño de agua. El poliestireno y las mezclas a diferentes composiciones y tamaño de partícula no se moldeaban a las guías provocando que el material no se mueva con facilidad desde la boquilla hasta el peletizador, por ello se prefirió enfriamiento por convección con aire forzado y posterior peletizado.

3.4 INCORPORACIÓN DE LAS PARTÍCULAS DE TAGUA A LA MATRIZ DE POLIESTIRENO

3.4.1 DISEÑO EXPERIMENTAL

EL diseño experimental 3^k en la cual k representa los factores: tamaño de partícula y concentración, refiriéndose este último al contenido de tagua presente en la matriz de poliestireno, que fue definido posterior a las pruebas preliminares realizadas.

En la Figura 3.8 se observa la cantidad de material retenido en diferentes mallas a partir de la muestra inicial sin ser molida, de estos datos se estableció que la mayor cantidad de material fue retenido entre las mallas 40 y 60.

Con estos resultados se resolvió moler el material con un molino de cuchillas a fin de tener un menor tamaño de partícula.

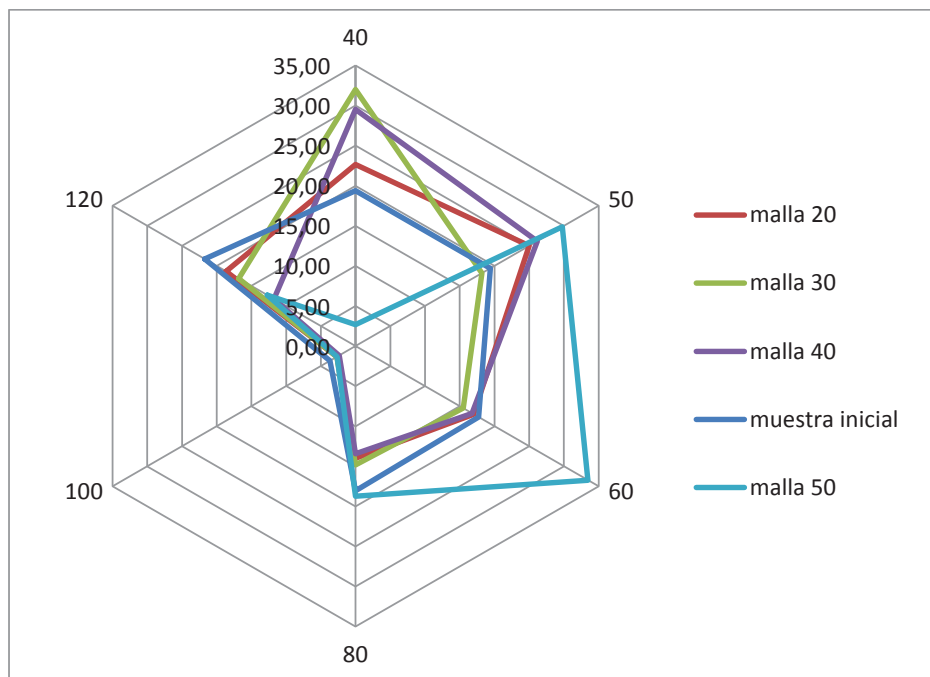


Figura 3.8. Gráfico del porcentaje de retenido acumulado de los residuos de la elaboración de botones de tagua a distintas mallas

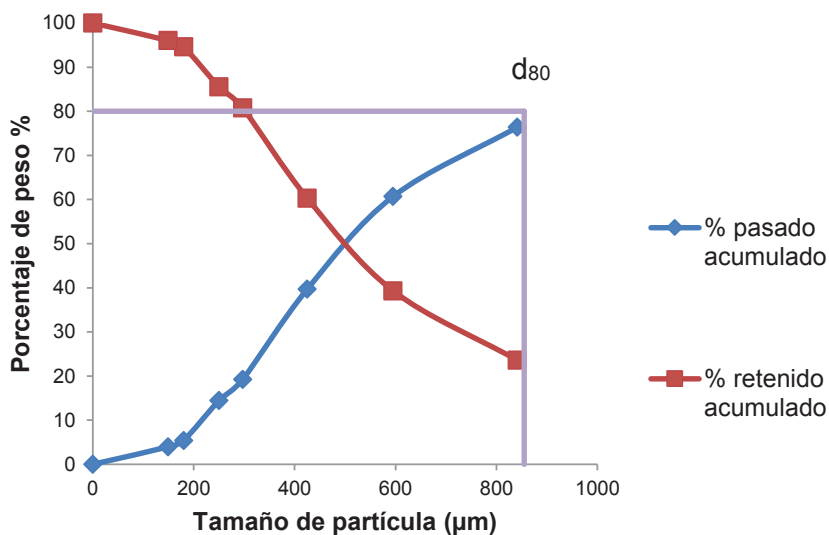
Los niveles del tamaño de partícula fueron los correspondientes a los números de malla 40, 60, 80 empleados para tamizar el polvo de tagua luego de la molienda a la cual fue sometida la muestra inicial. Se escogieron estos valores por la disponibilidad de tamices, además se tomó en cuenta que la extrusora empleada procesa grandes cantidades por lo que se requirió de la mayor disponibilidad posible de polvo de tagua.

En la Tabla 3.12 se muestra la cantidad disponible del polvo de tagua retenido en las diferentes mallas, los 4 kg de la base corresponde al polvo de tagua que paso la malla 80.

Tabla 3.12. Cantidad disponible de polvo de tagua para el desarrollo experimental

Numero de malla	Cantidad de polvo de polvo de tagua (kg)
40	12,0
60	12,5
80	7,0
Base	4,0

En la Figura 3.9 se observa el análisis granulométrico del polvo de tagua sin ser molido, del cual se obtuvo el valor del d_{80} , es decir la abertura del tamiz a la cual el 80 % de la muestra ha pasado fue de 850 μm , o que el 80 % del material tiene un tamaño de partícula menor que 850 μm , lo que corresponde a la malla 20.

**Figura 3.9.** Análisis granulométrico de los residuos de la elaboración de botones de tagua y determinación del d_{80} de la muestra inicial

De la Figura 3.10 se establece que la abertura del tamiz a la cual el 80 % de la muestra ha pasado fue de 425 μm , o que el 80 % del material tuvo un tamaño de partícula menor que 425 μm , lo que corresponde a la malla 40.

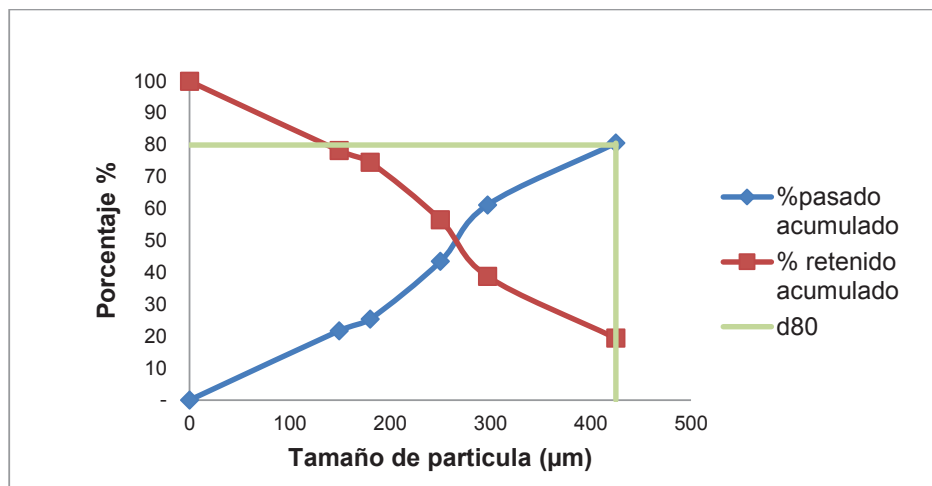


Figura 3.10. Análisis granulométrico de los residuos de la elaboración de botones de tagua y determinación del d_{80} de la muestra molida

Resultados de dispersión y distribución del material extruido

Los pellets del material extruido que se obtuvieron fueron empleados para elaborar placas mediante compresión. Inicialmente fue necesario probar varias condiciones de presión y temperatura ya que las primeras placas obtenidas presentaron burbujas. En la Figura 3.11 se observan dos placas con burbujas, estos defectos son producidos por las altas temperaturas a las que fueron elaboradas, además del tiempo al que fueron sometidas a determinada presión.

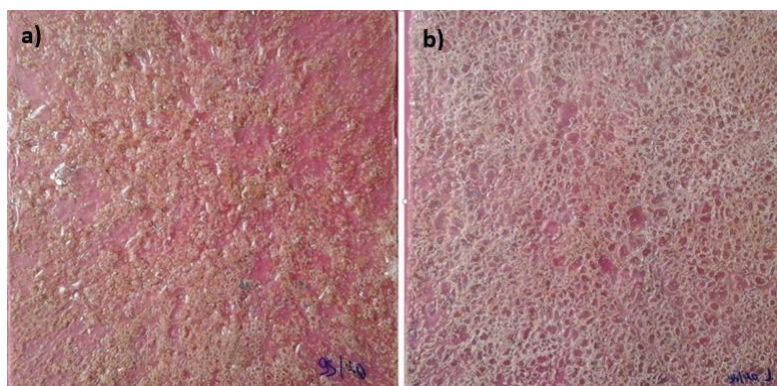


Figura 3.11. Placas obtenidas mediante moldeo por compresión para evaluar dispersión y distribución de pellets con 5 % polvo de tagua de malla 40: a) placa realizada a 180 °C, 10 minutos y 4 000 psi, b) placa realizada a 180 °C, 15 minutos y 4 000 psi

Para obtener placas sin burbujas se modificó inicialmente el tiempo; sin embargo, se mantuvo el efecto de aparición de burbujas por lo que se decidió reducir la temperatura. Con la disminución de la temperatura a 150 °C se obtuvieron placas con menor presencia de burbujas.

En la Figura 3.12 se muestra un par de placas elaboradas a 150 °C a diferentes tiempos, en la placa a) elaborada en 10 minutos hay aparición de ciertas burbujas que se visibilizan en la figura c) mediante la ampliación de una zona de la placa en la que se encontró presencia de burbujas. La placa b) fue realizada a la misma temperatura pero con tiempo de 15 minutos, esta placa evidenció una mayor presencia de burbujas; con estos resultados se estableció el tiempo para elaborar las placas en 10 minutos dividiéndolo en 2 minutos de calentamiento con la prensa abierta, luego se moldeó a 2 000 psi, se dejó salir el aire e inmediatamente se cerró la prensa a 4 000 psi. Además se redujo la temperatura a 140 °C, a esta temperatura el poliestireno se encuentra en estado fundido permitiendo elaborar las placas.

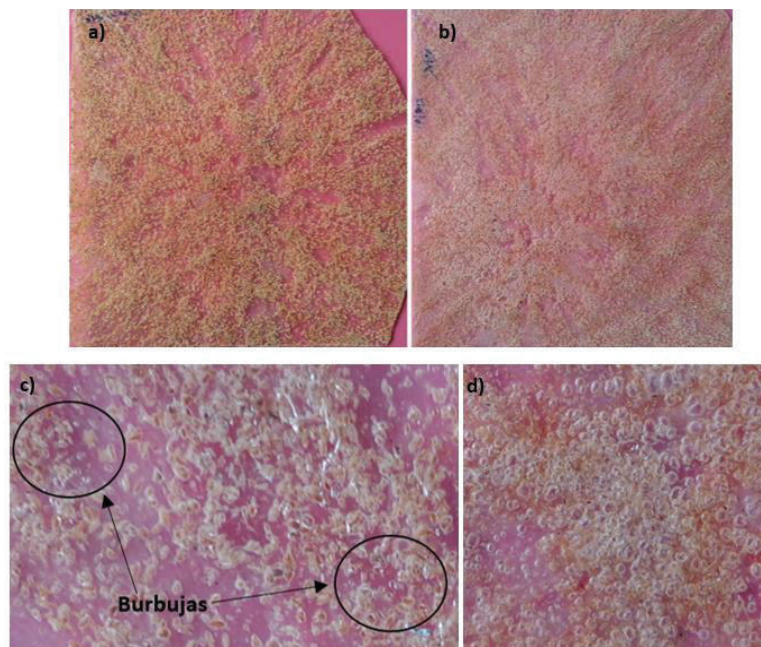


Figura 3.12. Placas obtenidas mediante moldeo por compresión para evaluar dispersión y distribución de pellets con 5 % de polvo de tagua de malla 40: a) placa realizada a 150 °C, 4 000 psi y 10 minutos, b) placa realizada a 150 °C, 4 000 psi y 15 minutos c) ampliación de la placa a), d) ampliación de la placa b)

A continuación se muestran las placas elaboradas a 140 °C, 10 minutos y 4 000 psi, estas placas corresponden a los diferentes tamaños de partícula y concentración determinados en el diseño experimental.

En la Figura 3.13 se observan las placas elaboradas con polvo de tagua de malla 40 a diferentes concentraciones 5, 10 y 15 % de polvo de tagua. Aparentemente existió una distribución aceptable, ya que se encuentran zonas más sombreadas que otras en todas las placas, las más evidentes se aprecian en la placa c) pues esta tiene mayor porcentaje de polvo de tagua, esta falta de homogeneidad probablemente es producto de los problemas de alimentación del poliestireno y del gradiente de velocidad generado al agregar el polvo de tagua.

En cuanto al cambio de coloración de las placas se debe al aumento de la concentración del polvo de tagua que a pesar de ser blanco al añadirse, toma esta coloración por su baja estabilidad térmica (Groover, 2007, p. 270).

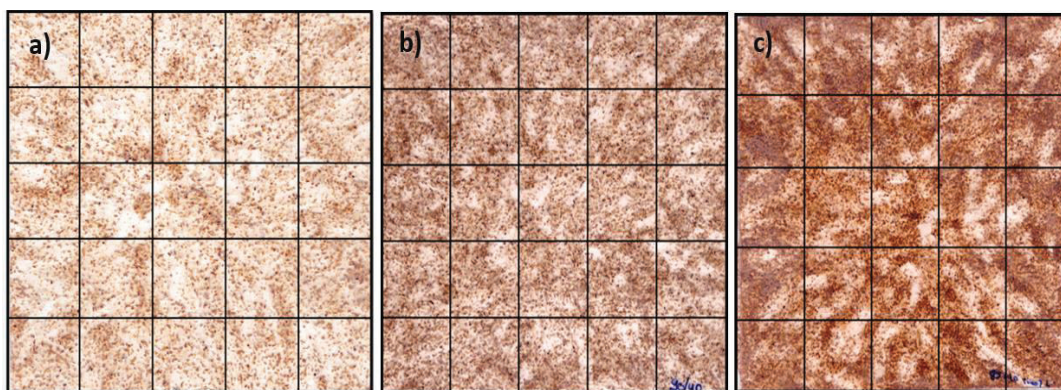


Figura 3.13. Placas obtenidas mediante moldeo por compresión para evaluar dispersión y distribución en pellets con polvo de tagua de malla 40: a) composición 95 % poliestireno 5 % polvo de tagua, b) composición 90 % poliestireno 10 % polvo de tagua, c) composición 85 % poliestireno 15 % polvo de tagua

Las placas de la Figura 3.14 corresponden a los pellets con 5, 10 y 15 % de polvo de tagua malla 60, al igual que en el caso anterior se observa una distribución aceptable para el 5 y 10 % de polvo de tagua, ya que al 15 % de polvo de tagua se encuentran zonas más cargadas y otras sin carga lo que evidencia problemas de procesamiento tanto de la alimentación del poliestireno como de la variación

de la velocidad de flujo que tiene la mezcla dentro de la extrusora, por la cantidad de carga (Groover, 2007, p. 270).

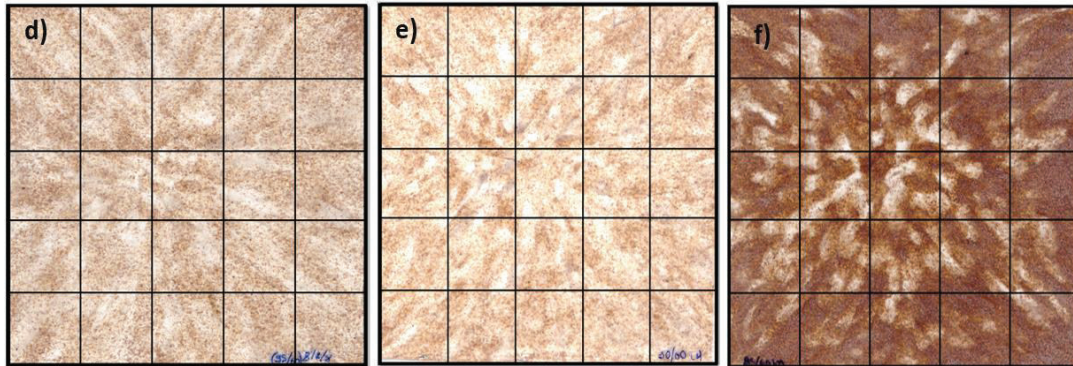


Figura 3.14. Placas obtenidas mediante moldeo por compresión para evaluar dispersión y distribución en pellets con polvo de tagua de malla 60: d) composición 95 % poliestireno 5% polvo de tagua, e) composición 90 % poliestireno 10 % polvo de tagua, f) composición 85 % poliestireno 15 % polvo de tagua

Finalmente en la Figura 3.15 se encuentran las placas elaboradas con polvo de tagua malla 80 a concentraciones de 5, 10 y 15% de polvo de tagua, se observa que tanto para las mallas 40 y 60 existe una dispersión aceptable en los porcentajes de 5 y 10 % de polvo de tagua, mientras que a mayor cantidad de carga, la calidad de la distribución es menor esto por los problemas de procesamiento ya mencionados (Groover, 2007, p. 270).

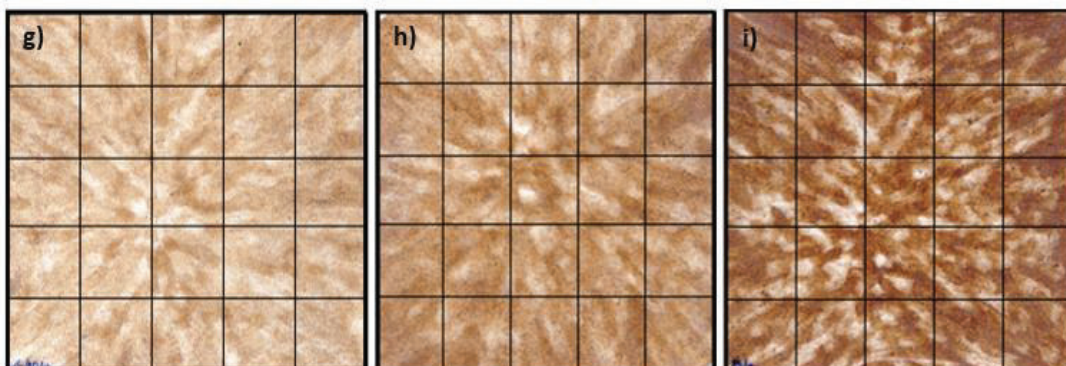


Figura 3.15. Placas obtenidas mediante moldeo por compresión para evaluar dispersión y distribución en pellets con polvo de tagua de malla 80: g) composición 95 % poliestireno 5% polvo de tagua, h) composición 90 % poliestireno 10 % polvo de tagua, i) composición 85 % poliestireno 15 % polvo de tagua

En las placas de las Figuras 3.13, 3.14 y 3.15 se realizaron análisis macroscópicos de la dispersión, obteniéndose valoraciones de la mezcla entre regular y aceptable, esto dependiendo de las concentraciones; por lo tanto se establece que a mayor concentración se reduce la calidad de la dispersión. En cuanto al análisis dispersivo este no se aplica para este caso pues no hay reducción del tamaño de partículas en la mezcla.

En vista que mediante extrusión se obtuvo una dispersión aceptable se esperaba mejorar la dispersión del polvo de tagua mediante inyección. Se empleó la inyección para elaborar las probetas que fueron sometidas a pruebas mecánicas; las probetas elaboradas mediante inyección a diferentes concentraciones y tamaño de partícula se observan en la Figura 3.16, ya que la matriz es traslúcida se analizaron dichas probetas a contraluz y se verificó la distribución de las partículas de polvo de tagua en la matriz, como resultados se apreció que todas las probetas tenían un distribución homogénea del polvo de tagua en la matriz. En cuanto al cambio de color, este se debe a la incorporación del polvo de tagua, resultando un color más oscuro conforme aumenta la cantidad de polvo de tagua.

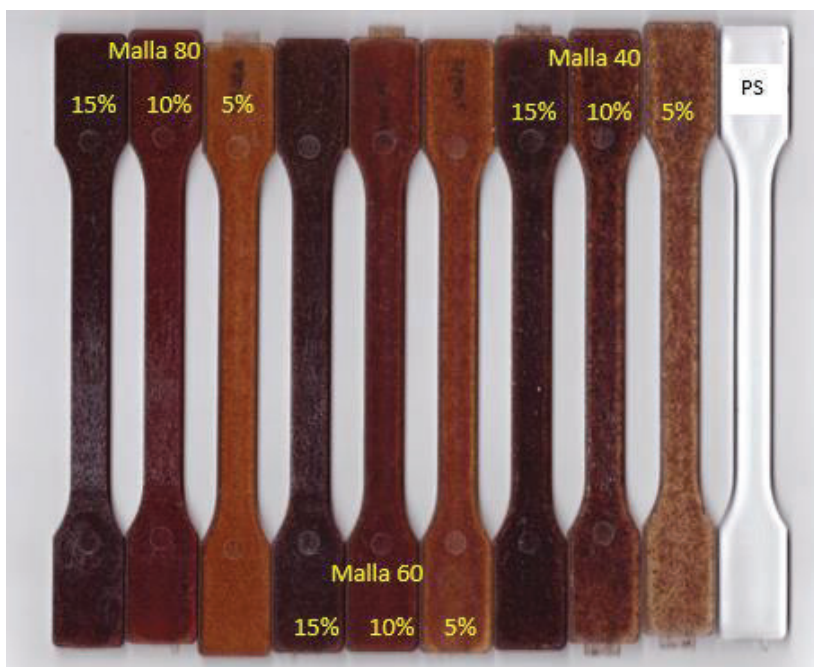


Figura 3.16. Probetas obtenidas mediante inyección a diferentes concentraciones y tamaño de partícula

3.4.2 ÍNDICE DE FLUIDEZ

Con los resultados expuestos en la sección 3.3.1, se observa que la dispersión de los pellets extruidos con del polvo de tagua y poliestireno no fue homogénea; por ello se realizaron pruebas de índice de fluidez de los pellets extruidos, con los resultados obtenidos se observa la variación del índice de fluidez al adicionar el polvo de tagua. Estos valores se presentan en la Tabla 3.13 y permiten determinar la influencia del porcentaje de polvo de tagua agregado a la matriz de poliestireno.

Con estos datos se infirió que hay una disminución del índice de fluidez provocado por la cantidad de tagua que se adicionó al poliestireno. En cuanto a los diferentes tamaños de partícula ensayados existió una disminución progresiva del índice de fluidez conforme aumentó la concentración del polvo de tagua.

Tabla 3.13. Índice de fluidez determinado a 200 °C y con 5 kg para los pellets obtenidos mediante extrusión a diferentes concentraciones y tamaño de partícula

Número de malla	Composición	Índice de fluidez (g/10 min)	Desviación estándar (g/10 min)
----	Poliestireno sin extruir	18,56	0,73
	Poliestireno extruido	22,22	1,52
Malla 40	95 % poliestireno 5 % tagua	19,70	1,50
	90 % poliestireno 10 % tagua	17,18	0,52
	85 % poliestireno 15 % tagua	15,97	0,77
Malla 60	95 % poliestireno 5 % tagua	19,61	0,91
	90 % poliestireno 10 % tagua	17,12	0,25
	85 % poliestireno 15 % tagua	16,04	0,38
Malla 80	95 % poliestireno 5 % tagua	19,56	0,56
	90 % poliestireno 10 % tagua	16,71	0,46
	85 % poliestireno 15 % tagua	13,74	0,95

La Tabla 3.14 evidencia el efecto de la cantidad de tagua presente en la matriz de poliestireno.

Tabla 3.14. Análisis de varianza de los resultados de índice de fluidez de los pellets extruidos a diferentes composiciones y tamaño de partícula, utilizando el programa STATGRAPHIC con nivel de confianza del 95 %

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>		<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Tamaño de partícula	1,344	1		1,344	5,54	0,100
B:Concentración	28,689	1		28,689	118,19	0,002
AA	0,399	1		0,399	1,64	0,289
AB	1,092	1		1,092	4,50	0,124
BB	0,376	1		0,375	1,55	0,302
Error total	0,728	3		0,243		
Total (corr.)	32,628	8				

Los análisis de varianza para el índice de fluidez muestran estadísticamente que para la concentración hay un valor F de 118,19 y un valor P menor a 0,05 por lo tanto la concentración produce un efecto significativo sobre el índice de fluidez de los pellets de poliestireno con polvo de tagua. Esto se debió a que las partículas de tagua no funden y dificultaron el flujo del material; por lo tanto se requiere mayor temperatura o presión en el segundo proceso de transformación mecánica mediante el cual se obtendrán las probetas que serán sometidas a ensayos de tracción y flexión (Groover, 2007, p. 270).

El diagrama de Pareto de la Figura 3.17 muestra gráficamente los resultados de la tabla de análisis de varianza. En esta gráfica se observa que el mayor efecto en la disminución del índice de fluidez es provocado por la concentración del polvo de tagua en el poliestireno; mientras el tamaño de partícula tiene un menor efecto sobre dicha propiedad. El efecto del tamaño de partícula y la combinación de ambos tienen un efecto similar en la disminución del índice de fluidez; sin embargo, ninguno se considera importante pues no llegan a sobrepasar la línea de referencia.

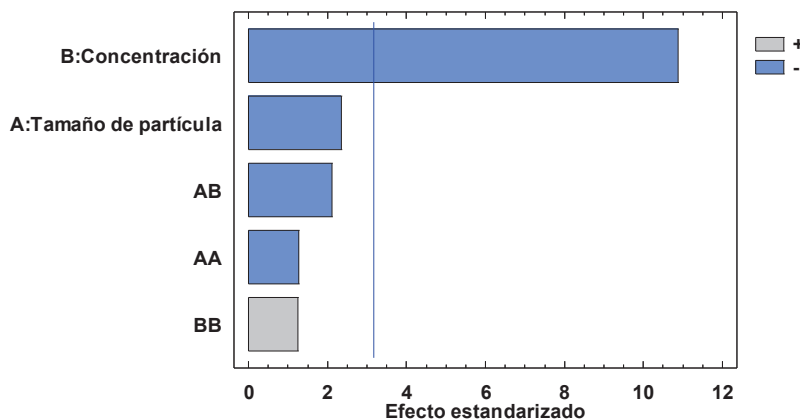


Figura 3.17. Diagrama de Pareto estandarizado de los resultados del índice de fluidez de los pellets extruidos a diferentes composiciones y tamaño de partícula; utilizando el programa STATGRAPHICS con nivel de confianza del 95 %

La Figura 3.18, presenta la gráfica de los efectos principales de la concentración y el tamaño de partícula para el índice de fluidez; del análisis de la gráfica se puede manifestar que a bajas concentraciones no hay interacción entre ambos factores, mientras que a una mayor concentración el tamaño de partícula tiene un efecto sobre la variable de respuesta. Además los valores de la Tabla 3.13 muestran que las probetas con 5 y 10 % de polvo de tagua manifestaron bajos efectos del tamaño de partícula; mientras las probetas cuyo contenido de tagua fue del 15 % presentaron mayores diferencias en los valores del índice de fluidez para los distintos tamaños de partícula respecto al poliestireno virgen. Para la malla 40 el valor es 15,97 g/10 min y para la malla 80 de 13,74 g/10 min (Jara, 2015, p. 85).

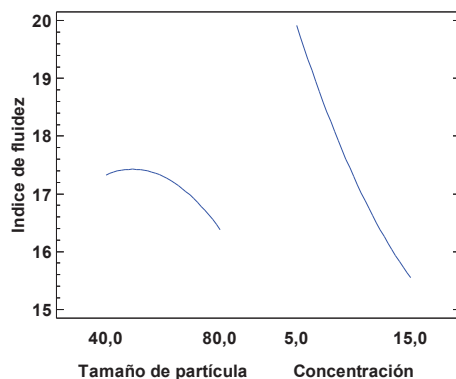


Figura 3.18. Gráfica de los efectos principales para el índice de fluidez de los pellets extruidos a diferentes concentraciones y tamaño de partícula; gráfico obtenido del análisis de resultados mediante STATGRAPHICS con nivel de confianza del 95 %

3.4.3 CONDICIONES DE PROCESAMIENTO POR INYECCIÓN PARA LA ELABORACIÓN DE PROBETAS

3.4.3.1 Perfil de temperatura de inyección

Para la determinación del perfil de temperatura de inyección se trabajó inicialmente solo con poliestireno para el cual se estableció el perfil de temperatura que se muestra en la Tabla 3.15. Luego se empleó el mismo perfil de temperatura para la incorporación del polvo de tagua; sin embargo, se observó que la tagua sufrió degradación por lo que se optó por disminuir el perfil de temperatura. La disminución de temperatura en las cuatro zonas de la inyectora se realizó tomando como base los resultados que presentó Brieva (2011), donde trabajó con variaciones de temperatura de 5 °C entre las zonas de calentamiento del equipo (pp. 30-32).

Para determinar el perfil de temperatura de inyección de poliestireno con polvo de tagua se consideró los datos bibliográficos de la Tabla 2.2 y los análisis térmicos tanto de la tagua como del poliestireno, ya que como se ha mencionado anteriormente la tagua posee poca estabilidad térmica, por lo que fue necesario disminuir el perfil de temperatura sin afectar la calidad de las probetas y sin apariencia visible de degradación de la tagua.

Tabla 3.15. Perfil de temperatura de la inyectora para procesar poliestireno y poliestireno con polvo de tagua

Zonas de calentamiento de la inyectora	Perfil de temperatura determinado para el poliestireno (°C)	Perfil de temperatura determinado para el poliestireno con tagua (°C)
Zona de alimentación	180	160
Zona compresión	200	170
Zona dosificación	200	180
Boquilla	210	190

3.4.3.2 Presión de inyección

En la Tabla 3.16 se aprecia que la presión de inyección necesaria para llenar entre el 90 y 95 % en peso de la probeta, estuvo comprendida entre presiones de 60 a 70 % de la presión específica de inyección. A estos valores de presión se les denominan punto de conmutación, pues a estas presiones se debió realizar el cambio de presión de inyección a presión de mantenimiento con la que terminó de llenarse la probeta. Para la inyección de poliestireno se consideró como presión de inyección 1 y 2 al 65 % de la presión específica de inyección y con los resultados de índice de fluidez se estableció que para la inyección de poliestireno con polvo de tagua la presión de inyección será mayor.

Tabla 3.16. Peso de las probetas de poliestireno elaboradas a distintos porcentajes de presiones de inyección 1 y 2, sin presión de mantenimiento

Presión de mantenimiento	Presión de inyección 1 (%)	Presión de inyección 2 (%)	Peso de inyección experimental (g)	Porcentaje de llenado de la probeta respecto al peso máximo de inyección teórico (%)	Porcentaje de llenado de la probeta respecto al peso máximo de inyección experimental (%)
0	5	5	0,61	2,10	2,21
0	10	10	1,53	5,25	5,53
0	15	15	2,23	7,64	8,04
0	20	20	3,39	11,64	12,25
0	25	25	4,83	16,58	17,44
0	30	30	6,15	21,13	22,23
0	35	35	7,77	26,69	28,08
0	40	40	10,39	35,68	37,54
0	45	45	14,10	48,42	50,94
0	50	50	17,89	61,44	64,64
0	55	55	23,20	79,67	83,82
0	60	60	27,36	93,94	98,83
0	65	65	27,58	94,71	99,64
0	70	70	28,08	96,41	101,43
0	75	75	28,69	98,51	103,63
0	80	80	29,13	100,02	105,22
0	85	85	28,90	99,24	104,41

El gráfico de la Figura 3.19, evidencia el aumento del peso de la pieza inyectada conforme aumenta la presión de inyección 1 y 2; sin embargo, a partir del 60 hasta 70 % de presión específica de inyección se logra mantener una constante en el peso de inyección, al sobrepasar estas presiones existe un aumento en el peso de las probetas debido a la presencia de rebabas en la pieza inyectada.

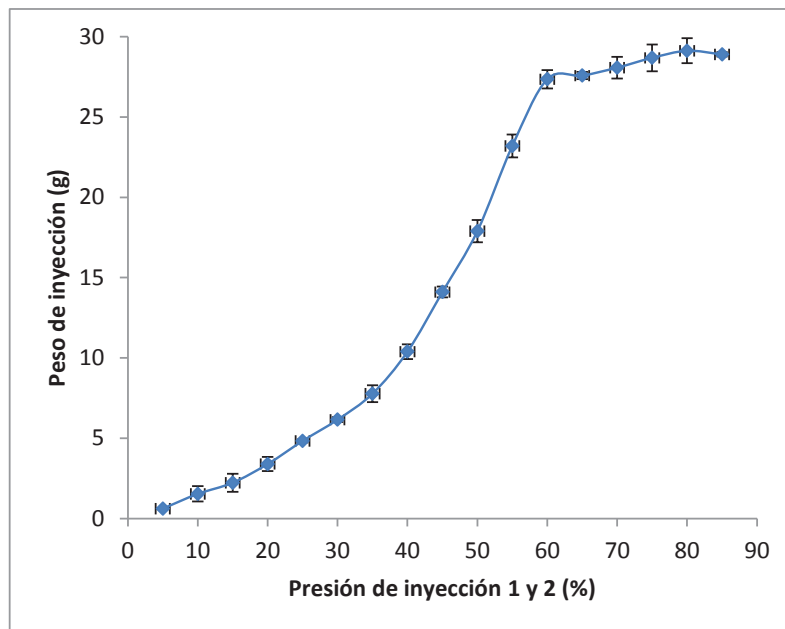


Figura 3.19. Gráfica de porcentaje de presión de inyección 1 y 2 versus el peso de inyección de las probetas de poliestireno

En cuanto a la presión de mantenimiento para inyectar poliestireno, esta se determinó con base en las presiones de inyección 1 y 2 de 65 y 70 % de la presión específica de inyección.

En la inyección de probetas a diferentes composiciones y tamaños de partícula se tuvo un aumento en la presión de inyección, por ende fue necesario establecer los valores de presión de mantenimiento para cada una de las mezclas, puesto que la presencia de polvo de tagua en concentraciones de 5, 10 y 15 % cambiaron las condiciones respecto al material virgen; los valores de presión de mantenimiento se determinaron con la verificación de peso de las probetas elaboradas a mayor presión que la presión de inyección, además se verificó que no exista la presencia de rebabas, estos resultados se muestran en el ANEXO IV.

Los valores de la Tabla 3.17 corresponden a la presión de mantenimiento y de inyección 1 y 2 que se deben emplear para la elaboración de las probetas; el poliestireno sin polvo de tagua tiene un valor de presión menor en un 5 % tanto en presión de inyección como en la de mantenimiento, esto se debe a la presencia del polvo de tagua en la matriz de poliestireno que genera mayor requerimiento de la presión de trabajo, ya que el fundido presenta mayor resistencia a fluir (Jara, 2015, p. 85).

Tabla 3.17. Presiones de mantenimiento determinadas para elaborar probetas a diferentes concentraciones y tamaño de partícula mediante inyección

Número de malla	Composición	Presión de inyección 1 y 2 (%)	Presión de mantenimiento (%)
----	Poliestireno virgen	65	70
Malla 40	95% poliestireno 5% tagua	65	70
	90% poliestireno 10% tagua	70	75
	85% poliestireno 15% tagua	70	75
Malla 60	95% poliestireno 5% tagua	65	70
	90% poliestireno 10% tagua	70	75
	85% poliestireno 15% tagua	70	75
Malla 80	95% poliestireno 5% tagua	65	70
	90% poliestireno 10% tagua	70	75
	85% poliestireno 15% tagua	70	75

3.4.3.3 Tiempo de inyección

Para la determinación del tiempo de inyección es necesario tomar en cuenta que este es uno de los parámetros a considerarse para determinar el tiempo del ciclo que corresponde al tiempo total del proceso de inyección en el cual se obtiene la

pieza en este caso las probetas. Entre los distintos tiempos del proceso de inyección a considerarse están el tiempo de cierre del molde, el de inyección, de mantenimiento, de plastificación, de enfriamiento y de apertura del molde y expulsión de la pieza.

El tiempo de cierre, apertura del molde y expulsión de la pieza son valores que se prefijaron, por lo que en el ensayo estos valores se consideraron constantes, además que estos parámetros no influyen directamente en las propiedades de la pieza (Groover, 2007, p. 278). Sin embargo, el tiempo de inyección depende de la presión de inyección, por ende al determinarse la presión de inyección el tiempo de inyección queda determinado.

El tiempo de plastificación está relacionado con la velocidad a la que retrocede el husillo mientras deja pasar material desde la tolva a la cámara de inyección formando una mezcla homogénea, por ende este valor depende de la temperatura de la cámara de inyección, velocidad de giro del husillo y la contrapresión por lo que al determinar estos se determina el tiempo de plastificación (Montalvo Soberón, 2007, p. 13).

El tiempo de mantenimiento y de enfriamiento son importantes pues estos influyen en las propiedades de la pieza; el exceso en el tiempo de postpresión provoca sobrepresión en la pieza y como efecto se observó agrietamiento en los canales por el cual pasa la colada con la que se llena la pieza.

Sin embargo, sin el suficiente tiempo de mantenimiento se produce una mala compactación de la pieza afectando tanto a su peso como a sus dimensiones e incluso se producen deformaciones en la superficie de la pieza; por lo que el tiempo de mantenimiento se estableció sobre la base de los resultados del análisis microscópico y control de peso de las probetas elaboradas a distintos tiempos (Brieva, 2011, pp. 28-30).

El tiempo de mantenimiento se fijó en 3 segundos con los cuales se obtuvo una pieza completa, sin agrietamientos, de pesos y dimensiones similares.

Tabla 3.18. Tiempo de mantenimiento para elaborar probetas de poliestireno con presión de inyección del 65 % y presión de mantenimiento de 70 % constantes

Presión de mantenimiento (%)	Presión de inyección 1 y 2 (%)	Peso de inyección (g)	Peso promedio de inyección (g)	Desviación estándar (g)	Tiempo de mantenimiento (s)	Observaciones
70	65	27,89	27,59	0,24	2	Pieza completa
70	65	27,22				Pieza completa
70	65	27,65				Pieza completa
70	65	28,15	28,21	0,32	3	Pieza completa
70	65	28,03				Pieza completa
70	65	28,46				Pieza completa
70	65	28,28	28,25	0,07	4	Pieza completa
70	65	28,31				Pieza con grietas
70	65	28,17				Pieza con grietas
70	65	28,74	29,32	0,53	5	Pieza con grietas
70	65	29,77				Pieza con grietas
70	65	29,44				Pieza rota

Como se explicó anteriormente, el tiempo de apertura y cierre del molde, de expulsión, plastificación e inyección dependen de la temperatura, presión, contrapresión, velocidad de giro del husillo y de las respectivas velocidades establecidas como condiciones fijas del Anexo II, por lo tanto corresponden a las condiciones fijas que se encuentran en la Tabla 3.19.

Tabla 3.19. Tiempo del proceso de inyección para elaborar probetas de poliestireno

	Descripción	Valor (segundos)
Condiciones fijas	Tiempo de apertura del molde	12
	Tiempo de cierre del molde	12
	Tiempo de expulsión	1
	Tiempo de plastificación	18
Condiciones determinadas	Tiempo inyección	4
	Tiempo de mantenimiento	3
	Tiempo de enfriamiento	30
	Tiempo del ciclo	80

En cuanto al tiempo de enfriamiento este parámetro requirió especial atención, porque el enfriamiento empieza el instante que el material ingresa al molde y se requiere de velocidades y presiones necesarias para que el material fluya dentro del molde y se compensen las contracciones que sufre el material al solidificarse; por lo tanto esta primera fase es un valor fijo.

Sin embargo, el tiempo de enfriamiento requerido para que los expulsores empujen una pieza sólida y no la atraviesen se fijó inicialmente en 25 segundos. Para determinar este valor se consideraron dos variables el flujo de agua de enfriamiento proveniente del chiller y la temperatura de la misma.

Cabe mencionar que conforme se elaboraron las piezas, el tiempo de enfriamiento fue aumentando, ya que la temperatura del agua de enfriamiento sufrió incrementos de temperatura de hasta 4 °C por la cantidad de piezas elaboradas por lo tanto fue necesario aumentar del flujo de agua de enfriamiento a fin de mantener el tiempo de enfriamiento constante. Para determinar el tiempo del ciclo se consideró un tiempo promedio de 30 segundos.

3.4.4 DENSIDAD DE LAS PROBETAS INYECTADAS

En la Tabla 3.20 se exponen los resultados de la determinación de densidad de las probetas elaboradas mediante inyección a diferentes concentraciones y tamaño de partícula.

Se observa que conforme aumentó la cantidad de polvo de tagua en la matriz también aumentó la densidad sin ser relevante el tamaño de partícula del polvo de tagua.

El ligero aumento de la densidad se debe a que este material se ajusta a la teoría de las mezclas que indica que la densidad de una mezcla está en función de cada una de las densidades y de las proporciones de cada componente en la mezcla (Newel, 2010, p. 229).

Tabla 3.20. Densidad de las piezas inyectadas a diferentes composiciones y tamaño de partícula

Número de malla	Composición	Densidad (g/cm ³)	Desviación estándar (g/cm ³)
---	Poliestireno inyectado	1,046	0,001
Malla 40	95% poliestireno 5% tagua	1,065	0,005
	90% poliestireno 10% tagua	1,083	0,001
	85% poliestireno 15% tagua	1,098	0,001
Malla 60	95% poliestireno 5% tagua	1,062	0,002
	90% poliestireno 10% tagua	1,083	0,003
	85% poliestireno 15% tagua	1,098	0,000
Malla 80	95% poliestireno 5% tagua	1,065	0,001
	90% poliestireno 10% tagua	1,080	0,001
	85% poliestireno 15% tagua	1,099	0,001

La Tabla 3.21 muestra los datos obtenidos mediante el análisis de varianza de los resultados de densidad, se muestra el mayor valor de razón F de 488,39 para el factor de concentración, por lo que se infiere que la concentración es estadísticamente significativa en cuanto a la variación de la densidad de las probetas que se elaboraron mediante inyección.

Tabla 3.21. Análisis de varianza de los resultados de densidad de las probetas inyectadas a diferentes composiciones y tamaño de partícula; obtenido mediante el programa STATGRAPHICS con nivel de confianza del 95 %

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Tamaño de partícula	6,667E-7	1	6,667E-7	0,180	0,6968
B:Concentración	1,768E-3	1	1,768E-3	488,390	0,0002
AA	8,889E-7	1	8,889E-7	0,250	0,6543
AB	2,500E-7	1	2,500E-7	0,070	0,8097
BB	1,389E-6	1	1,389E-6	0,380	0,5795
Error total	1,0836E-5	3	3,620E-6		
Total (corr.)	1,782E-3	8			

El diagrama de Pareto que se presentan en la Figura 3.20 corrobora el efecto de la concentración establecido sobre la base de los datos de la tabla de análisis de

varianza de los resultados de densidad; además el diagrama muestra que el efecto estandarizado para el tamaño de partícula y la combinación de ambos factores es irrelevante pues estos están bajo la línea de referencia, la misma que indica que la concentración es el factor más importante que afecta a los resultados de densidad.

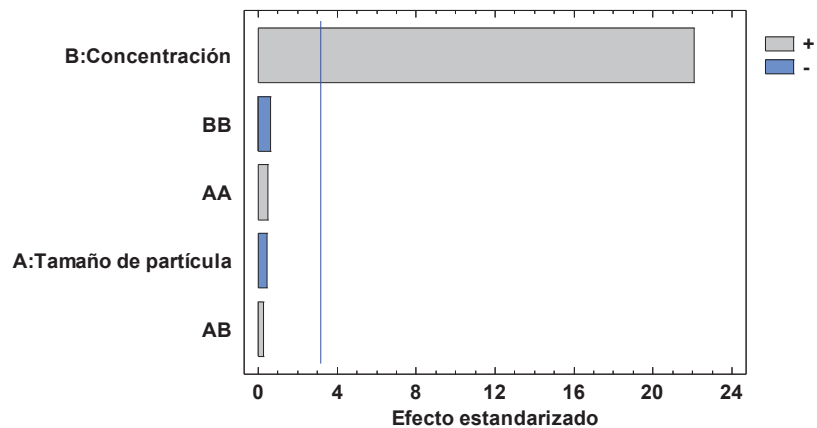


Figura 3.20. Diagrama de Pareto estandarizado de la densidad de las probetas obtenidas mediante inyección a diferentes concentraciones y tamaño de partícula; gráfico obtenido del análisis de resultados mediante STATGRAPHICS con nivel de confianza del 95 %

La Figura 3.21 muestra los efectos principales para los resultados de densidad, se observa que la concentración tiene mayor efecto sobre la densidad de la muestra, ya que la pendiente de la curva es mayor que en el caso de los efectos del tamaño de partícula para la densidad.

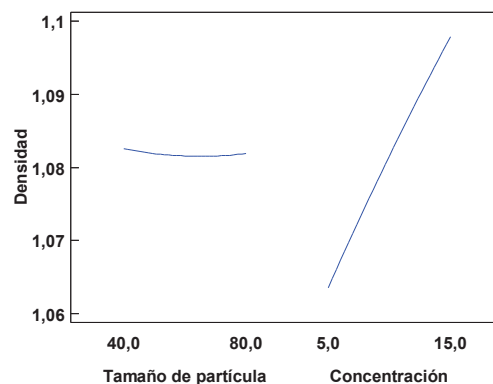


Figura 3.21. Gráfica de los efectos principales de la densidad de las probetas obtenidas mediante inyección a diferentes concentraciones y tamaño de partícula; gráfico obtenido del análisis de resultados mediante STATGRAPHICS con nivel de confianza del 95 %

3.4.5 ENSAYOS MECÁNICOS

Finalmente, se realizaron pruebas mecánicas de tracción y de flexión sobre las probetas elaboradas mediante inyección. Los resultados de las pruebas de flexión se encuentran detallados en el ANEXO X, con estos datos se realizó el gráfico carga de flexión versus extensión que se presentan en la Figura 3.22.

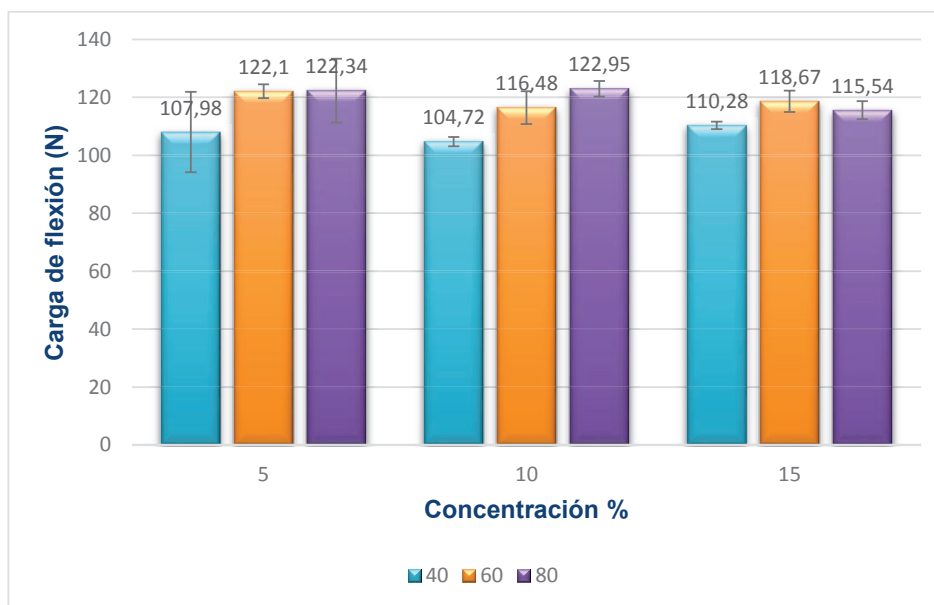


Figura 3.22. Gráfica de carga de flexión versus concentración del polvo de tagua de las mallas 40, 60 y 80 en probetas elaboradas mediante inyección

La gráfica de la Figura 3.22 muestra que la mayor carga de flexión lo soportaron las probetas con un contenido de 10 % de polvo de tagua de la malla 80, incluso a una concentración del 5 % el valor de carga de flexión soportado por las probetas con tagua de malla 80 es mayor que en probetas con la misma concentración pero en probetas con polvo de tagua de malla 60; sin embargo, existe una marcada diferencia entre la carga de flexión que soportan las probetas con polvo de tagua de malla 40 a las diferentes concentraciones, comparado con la carga de flexión que soportan las probetas con polvo de tagua de malla 60 y 80.

Esta variación puede ser resultado de los problemas de incompatibilidad entre el refuerzo y la matriz, ya que al tener un tamaño de partícula más grande la matriz manifiesta dificultades en rodear dicha partícula (Newel, 2010, p. 227).

La Tabla 3.22 muestra los resultados obtenidos en el ensayo de flexión, sobre la base de estos resultados se determinó que el valor promedio de extensión alcanzado por el poliestireno virgen fue de 7,14 mm, al comparar este resultado con los valores de extensión de las probetas con polvo de tagua de malla 40 a distintas composiciones, se observó que existe una disminución de la elongación del material antes de romperse; por lo que la incorporación del polvo de tagua de malla 40 a la matriz aumentó la fragilidad del poliestireno.

Las probetas de poliestireno con polvo de tagua malla 60 y composición 10 y 15 %, tuvieron valores promedio de extensión menores al que presentó el poliestireno virgen, pero este comportamiento no se observó en las probetas de composición al 5 %. Además se puede acotar que la variación del promedio de extensión entre las probetas de malla 60 y 40 para las composiciones de 10 y 15 % no presentaron mayores diferencias.

Por último al comparar los valores promedio de extensión de las probetas con polvo de tagua malla 80 a diferentes composiciones, se observó que con una composición del 5 % el valor de extensión se aproximó al reportado para el poliestireno virgen. En cuanto a las composiciones de 10 y 15 % se observó aumento del valor promedio de extensión, por lo que hubo mayor elongación del material antes de romperse disminuyéndose la fragilidad del poliestireno. Sobre la base de estos resultados se concluye que a mayor cantidad de polvo de tagua con un tamaño de partícula de 180 μm incorporado a la matriz se obtienen probetas más flexibles.

Los valores de extensión de los ensayos de flexión de las probetas inyectadas presentan diferentes comportamientos al ser sometidas a una fuerza. Este comportamiento varió dependiendo de la concentración y de tamaño de partícula del polvo de tagua incorporado. Para poder determinar cuál factor, la concentración, el tamaño de partícula del polvo de tagua o la combinación de ambos factores fueron los que afectaron las propiedades mecánicas de flexión de las probetas inyectadas; se realizó un análisis estadístico con los resultados de esfuerzo tanto de flexión como de tracción

Tabla 3.22. Extensión por carga de flexión de las probetas inyectadas a diferentes composiciones y tamaño de partícula

Número de malla	Composición	Extensión (mm)	Desviación estándar (mm)
---	Poliestireno inyectado	7,14	0,33
Malla 40	95% poliestireno 5% tagua	6,51	0,86
	90% poliestireno 10% tagua	6,49	0,32
	85% poliestireno 15% tagua	6,11	0,22
Malla 60	95% poliestireno 5% tagua	7,61	0,93
	90% poliestireno 10% tagua	6,54	0,37
	85% poliestireno 15% tagua	6,63	0,25
Malla 80	95% poliestireno 5% tagua	6,81	0,10
	90% poliestireno 10% tagua	8,68	1,06
	85% poliestireno 15% tagua	8,86	0,19

La Figura 3.23 muestra el comportamiento de las probetas de poliestireno y las probetas elaboradas a diferentes composiciones con polvo de tagua malla 40, que fueron sometidas a una carga por flexión. Si bien la gráfica es de probetas inyectadas con polvo de tagua malla 40, las gráficas de extensión versus carga de flexión de malla 60 y 80 presentaron la misma tendencia y son similares a las que se reportan para materiales frágiles (Newel, 2010, p. 75).

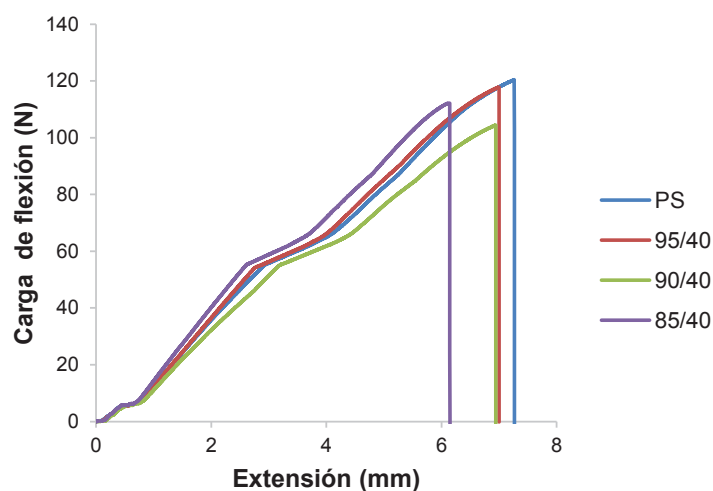


Figura 3.23. Gráfica de carga de flexión versus extensión de las probetas de poliestireno con polvo de tagua malla 40 a diferentes composiciones elaboradas mediante inyección

El análisis estadístico realizado mediante el programa STATGRAPHICS con base en los datos de tracción y de flexión se determinó cuál de los factores, concentración, tamaño de partícula o la combinación de ambos afectó las propiedades mecánicas del poliestireno con polvo de tagua. Los resultados con los que se trabajó para el análisis estadístico se presentan en la Tabla 3.23.

Tabla 3.23. Esfuerzos de tracción y flexión de las probetas elaboradas mediante inyección a diferentes concentraciones y tamaño de partícula

Número de malla	Composición	Esfuerzo de tracción		Esfuerzo de flexión	
		Promedio (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Promedio (MPa)	Desviación estándar (MPa)
---	Poliestireno inyectado	49,4	2,15	82,7	3,66
Malla 40	95% poliestireno 5% tagua	26,8	1,36	72,2	9,26
	90% poliestireno 10% tagua	27,4	0,87	70,0	1,08
	85% poliestireno 15% tagua	26,4	2,18	73,7	0,86
Malla 60	95% poliestireno 5% tagua	37,7	5,72	81,6	1,56
	90% poliestireno 10% tagua	35,6	2,99	77,9	3,78
	85% poliestireno 15% tagua	38,2	4,39	79,3	2,54
Malla 80	95% poliestireno 5% tagua	46,6	1,74	81,8	7,36
	90% poliestireno 10% tagua	43,6	2,33	82,2	1,85
	85% poliestireno 15% tagua	41,5	1,89	77,4	2,08

Las Tablas 3.24 y 3.25 muestran los resultados del análisis de varianza para tracción y flexión; se evidencia el efecto del tamaño de partícula del polvo de tagua incorporado a la matriz de poliestireno para ambos ensayos, tanto la razón F como el valor P son menores a 0,05 lo que demuestra que los resultados son estadísticamente significativos. Además al comparar ambas tablas se advierte que el efecto del tamaño de partícula del polvo de tagua es mayor para el ensayo

de tracción que para el de flexión, esto comparando los valores de la razón F y el valor P que para la tracción es de 189,9 y 0,0008 respectivamente, mientras que para la flexión la razón F es 27,4 y el valor P es 0,0138.

Tabla 3.24. Análisis de varianza para los resultados de tracción de las probetas inyectadas a diferentes composiciones y tamaño de partícula; obtenido mediante el programa STATGRAPHICS con nivel de confianza del 95 %

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:tamaño de partícula	435,202	1	435,202	189,900	0,0008
B:concentración	4,167	1	4,1667	1,820	0,2703
AA	6,361	1	6,361	2,780	0,1943
AB	5,523	1	5,523	2,410	0,2184
BB	0,889	1	0,889	0,390	0,5776
Error total	6,875	3	2,292		
Total (corr.)	459,016	8			

Tabla 3.25. Análisis de varianza para los resultados de flexión de las probetas inyectadas a diferentes composiciones y tamaño de partícula; obtenido mediante el programa STATGRAPHICS con nivel de confianza del 95 %

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Concentración	5,227	1	5,227	1,260	0,3427
B:Tamaño de partícula	111,802	1	111,802	27,040	0,0138
AA	1,620	1	1,620	0,390	0,5757
AB	7,563	1	7,563	1,830	0,2692
BB	23,805	1	23,805	5,760	0,0959
Error total	12,404	3	4,135		
Total (corr.)	162,420	8			

El diagrama de Pareto estandarizado para tracción se encuentra en la Figura 3.24 muestra el efecto que tiene el tamaño de partícula; la contrasta con el efecto

producido por la concentración y la combinación de ambos factores, así se determinó que el efecto del tamaño de partícula sobre los resultados de las pruebas de tracción fue mayor que el efecto producido por la concentración; no obstante el efecto de la combinación de ambos factores es ligeramente mayor al efecto producido solo por la concentración.

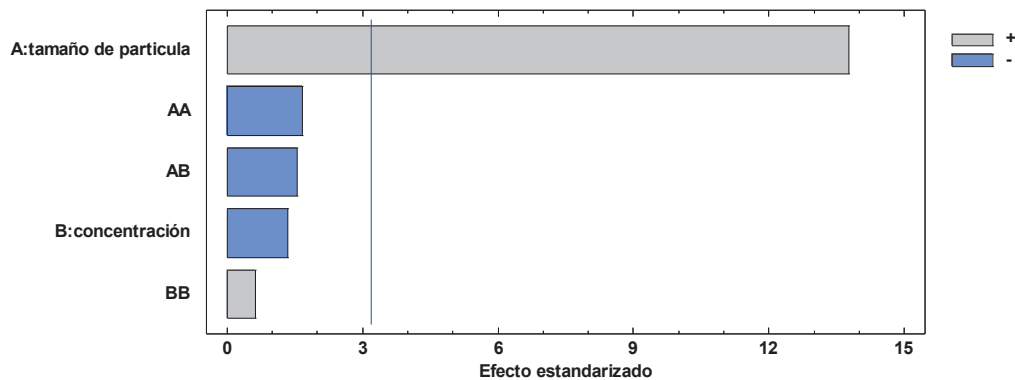


Figura 3.24. Diagrama de Pareto estandarizado de los resultados del ensayo de tracción de las probetas inyectadas a diferentes composiciones y tamaño de partícula; gráfico obtenido mediante STATGRAPHICS con nivel de confianza del 95 %

El diagrama de Pareto estandarizado de la Figura 3.25., muestra el efecto producido por el tamaño de partícula del polvo de tagua, la concentración y la combinación de ambos factores sobre los resultados de flexión; se identificó como factor más importante al tamaño de partícula seguido de la combinación de ambos factores y finalmente de la concentración,

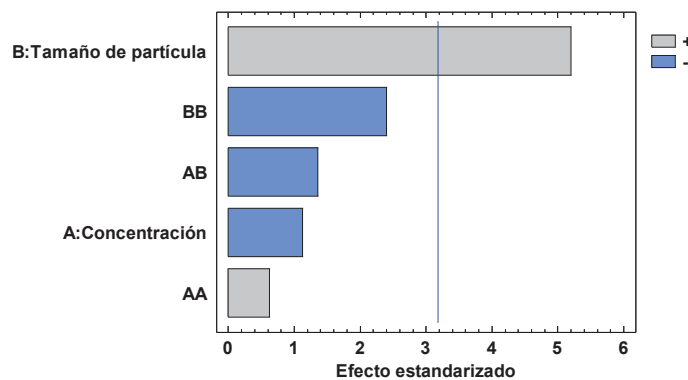


Figura 3.25. Diagrama de Pareto estandarizado de los resultados del ensayo de flexión de las probetas inyectadas a diferentes composiciones y tamaño de partícula; gráfico obtenido mediante STATGRAPHICS con nivel de confianza del 95 %

Este gráfico muestra que hay un efecto significativo del tamaño de partícula del polvo de tagua en los resultados de esfuerzo de flexión, ya que con los gráficos de la Figura 3.22 no se podía hacer esta afirmación, pues los resultados no presentaban una tendencia.

Al comparar los dos diagramas de Pareto se observa que la adición de polvo de tagua a la matriz de poliestireno afecta los resultados tanto de flexión como de tracción; sin embargo, el efecto de la concentración es mayor en las pruebas de tracción, esto corresponde a la fragilidad del poliestireno que puede generar ciertas imprecisiones en el ensayo de tracción (Newel, 2010, p. 78).

Las Figuras 3.26 y 3.27, muestran los efectos principales de la concentración y del tamaño de partícula entre sus diferentes niveles. El efecto de la concentración es casi paralelo al eje de las X por lo que se afirma que no hay un efecto principal en los ensayos de tracción así como en los de flexión.

En cuanto al tamaño de partícula hay efectos de este factor en la variable de respuesta, ya que los diferentes tamaños de malla afectan los resultados de los ensayos de tracción y flexión, en cuanto a la magnitud de afectación se observa que la mayor pendiente se encuentra en la gráfica de efectos principales para flexión.

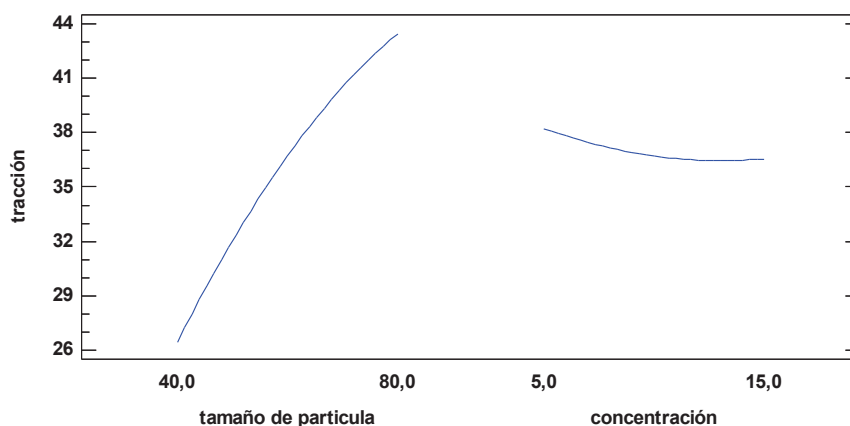


Figura 3.26. Gráfica de los efectos principales para los resultados del ensayo de tracción de las probetas inyectadas a diferentes composiciones y tamaño de partícula; gráfico obtenido mediante STATGRAPHICS con nivel de confianza del 95 %

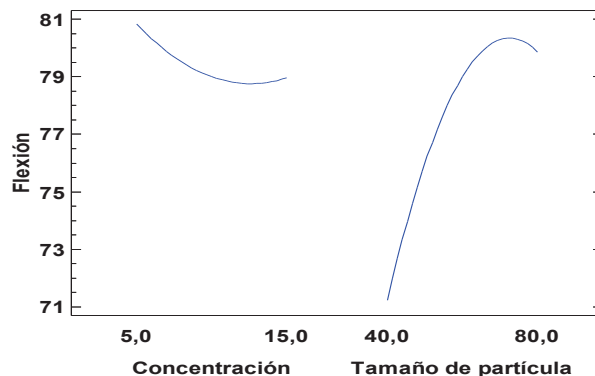


Figura 3.27. Gráfica de los efectos principales para los resultados del ensayo de flexión de las probetas inyectadas a diferentes composiciones y tamaño de partícula; gráfico obtenido mediante STATGRAPHICS con nivel de confianza del 95 %

3.4.6 ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICOS

Los resultados de los análisis termogravimétricos muestran la variación de peso de las muestras de matriz de poliestireno con polvo de tagua que han sido procesadas mediante extrusión e inyección. Conforme los resultados de la investigación de García (1995), generalmente los polímeros tienen una alta temperatura de descomposición térmica alrededor de 400 °C, además sugiere que la temperatura de descomposición inicial hace una primera aproximación del comportamiento de un nuevo material frente al cambio de temperatura (p. 60).

Si se compara el termograma del poliestireno virgen con los termogramas obtenidos después de la incorporación del polvo de tagua se observa que en el primero hay solo una pérdida de peso comprendida entre 235,16 y 485,06 °C perdiendo el 99,7 % de peso mientras en las muestras de poliestireno con polvo de tagua se observan tres pérdidas de peso, la primera correspondiente a la pérdida de agua, la segunda a la degradación del polvo de tagua y la ruptura de algunos enlaces del poliestireno y finalmente a la degradación del polímero.

El termograma de la Figura 3.28 corresponde a la muestra de composición 95 % poliestireno y 5 % de polvo de tagua malla 40; esta gráfica presenta tres pérdidas importantes de peso; la primera alrededor de 100 °C con una pérdida del 2,73 %

de peso, la pérdida de peso en este rango correspondió a la eliminación de agua que contiene la muestra, este valor es mínimo pues el poliestireno tiene un bajo porcentaje de absorción de agua.

La segunda pérdida de peso de 9,21 % entre 98,48 y 353,81 °C, estos valores correspondieron a la degradación del polvo de tagua, así como a la ruptura de enlaces de la matriz lo que desprende elementos volátiles. Finalmente el 84,16 % de pérdida de peso se produce a una temperatura media de 424,23 °C que correspondió a la degradación de la matriz.

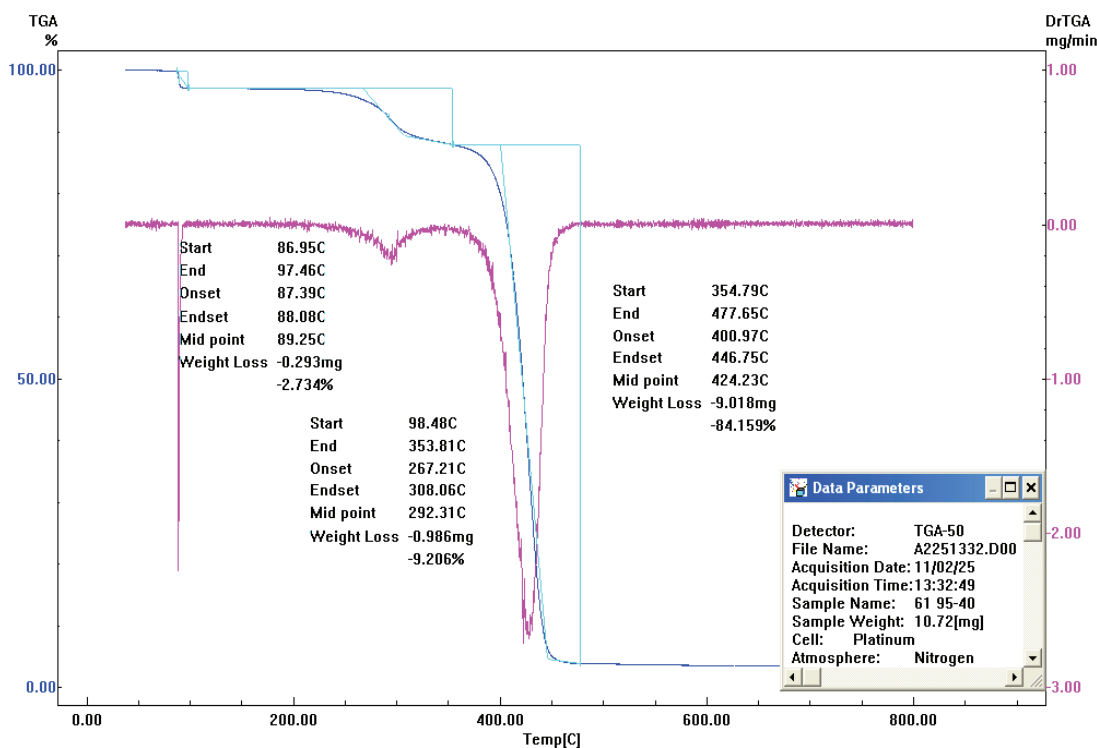


Figura 3.28. Curva de análisis TGA de la muestra de matriz de poliestireno con 5 % polvo de tagua malla 40

La Figura 3.29 expone el termograma de la muestra 90 % poliestireno y 10 % de polvo de tagua malla 40; al igual que en el termograma anterior existió tres pérdidas de peso, la primera pérdida de peso de menos del 1 % inició a muy baja temperatura y se extendió desde 29,7 hasta 237,2 °C, este porcentaje responde a la hidrofobicidad de la matriz que no permitió la absorción de agua para esta muestra, no obstante en esta primera fase al alcanzar una temperatura mayor a

200 °C indicó que hay una ruptura de enlaces de ciertas hexosas y pentosas. La siguiente pérdida de peso fue entre 238,39 y 313,14 °C que correspondió a la degradación de hemicelulosas y celulosas de menor peso molecular; por último está la degradación de las celulosas y del poliestireno entre 350,48 y 485,09 °C.

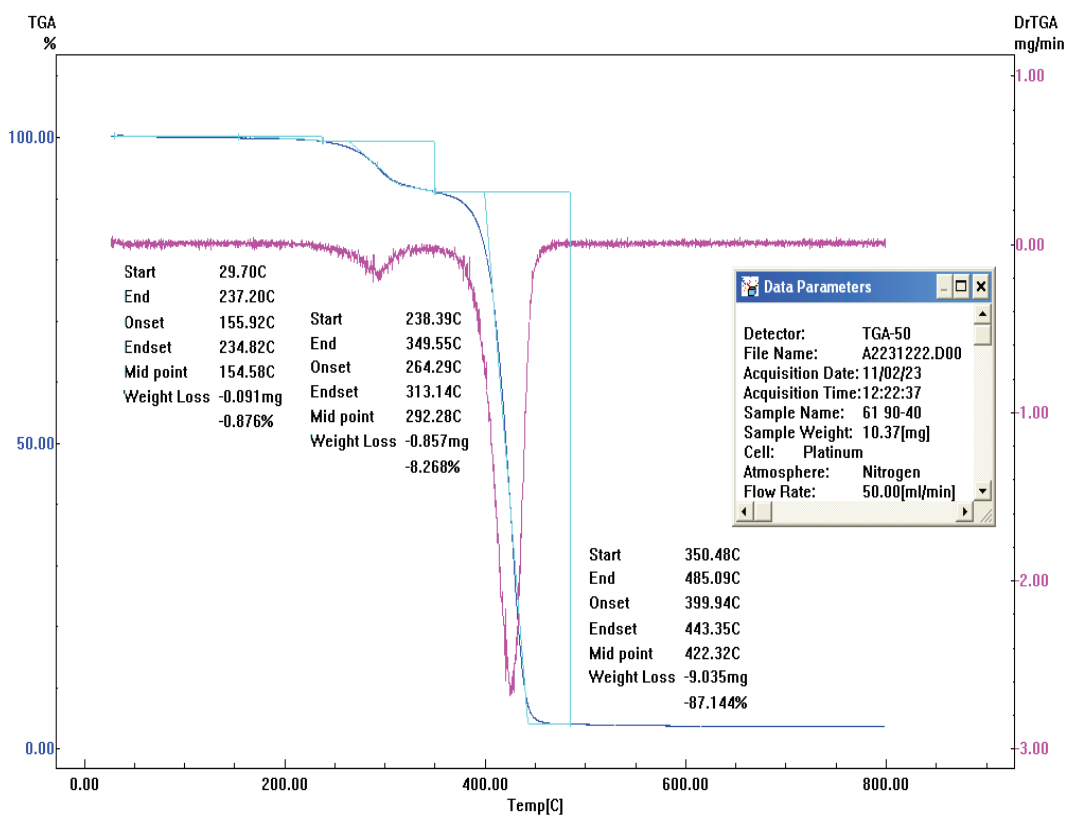


Figura 3.29. Curva de análisis TGA de la muestra de matriz de poliestireno con 10 % polvo de tagua malla 40

La Figura 3.30 muestra el termograma del poliestireno con 15 % de polvo de tagua malla 40 con tres pérdidas de peso, la primera de 1,47 % de peso entre 30,25 y 234,40 °C, la segunda con un 12,16 % de pérdida de peso entre 235,44 y 349,28 °C este rango de temperaturas fue similar al de la muestra de 90 % poliestireno y 10 % de tagua; a pesar de tener rangos de temperatura semejantes, el porcentaje de peso perdido fue mayor lo que confirma la degradación del polvo de tagua en esta muestra que tiene mayor porcentaje de composición. Finalmente la mayor pérdida de peso corresponde a la degradación de celulosa y de poliestireno en un rango de temperatura similar al de las Figura 3.28 y 3.29.

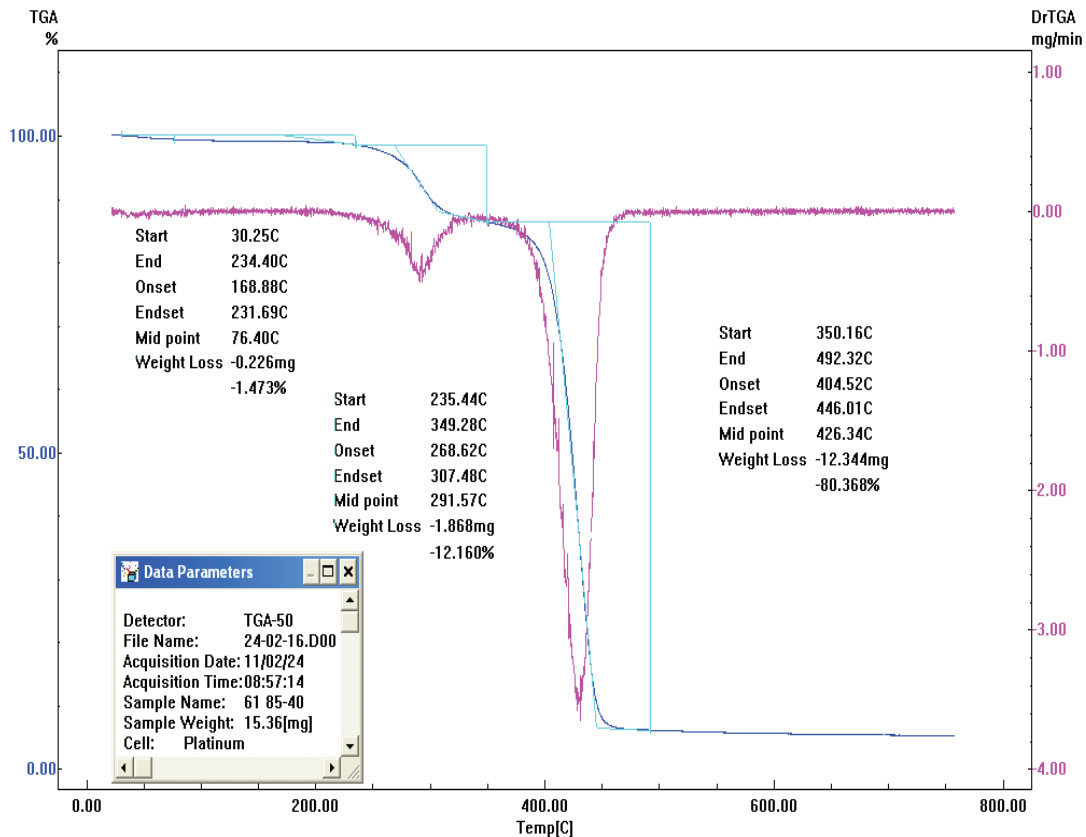


Figura 3.30. Curva de análisis TGA de la muestra de matriz de poliestireno con 15 % polvo de tagua malla 40

La Figura 3.31 muestra el termograma del poliestireno con 5 % de polvo de tagua de malla 60, en este termograma se observaron solo dos pérdidas de peso la primera inició a 224,75 °C y terminó a 336,84 °C con una pérdida de 5,63 % de peso de la muestra en este rango de temperatura se esperó la degradación de hemicelulosas de bajo peso molecular presentes en el polvo de tagua y la ruptura de algunos enlaces de la matriz pues a esta temperatura se observó el inicio de pérdida de peso en el termograma de poliestireno virgen.

La segunda pérdida de peso inició a 337,85 hasta 480,82 °C y corresponde a la degradación de celulosa y poliestireno.

Este es el único termograma que tuvo solo dos pérdidas de peso, iniciándose la primera a una temperatura mayor a 200 °C lo que indica que la muestra no contenía agua.

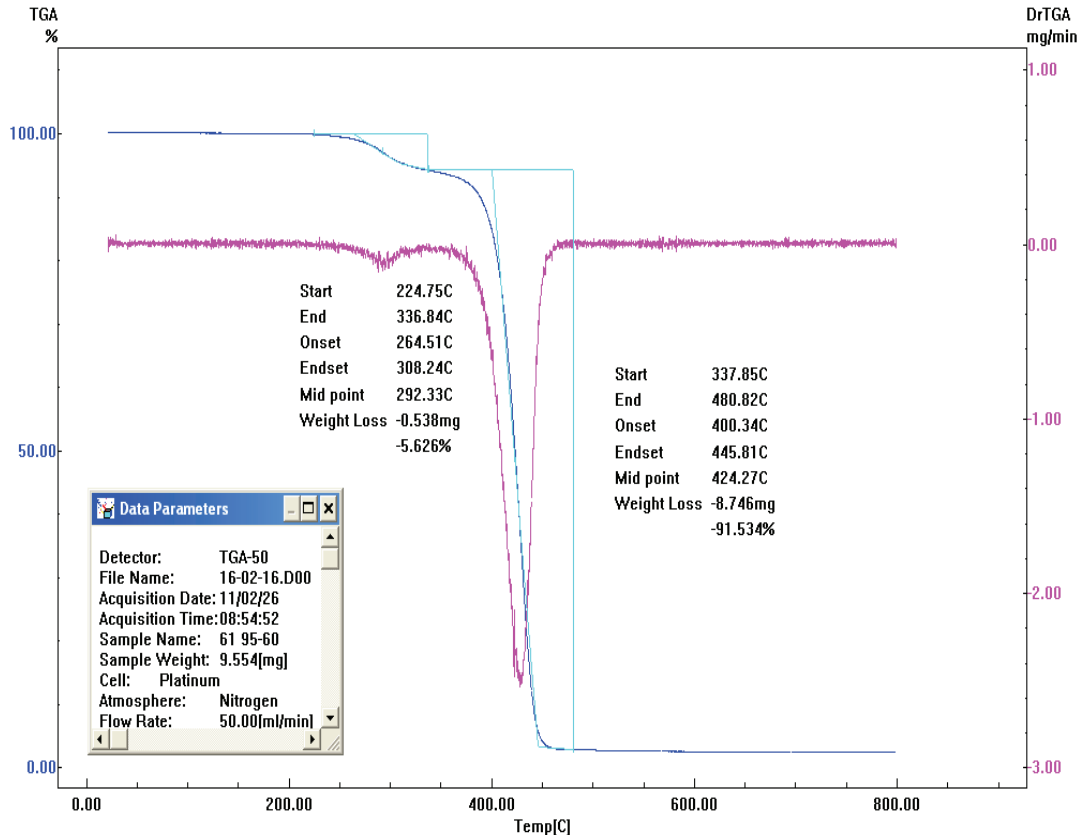


Figura 3.31. Curva de análisis TGA de la muestra de matriz de poliestireno con 5 % polvo de tagua malla 60

El termograma de la Figura 3.32 presenta tres pérdidas de peso, la primera con una disminución de peso del 2,01 %, la segunda de 9,84 % y finalmente de 83,89 %.

La segunda y tercera pérdidas de peso por el rango de temperaturas que abarcan desde 115 hasta 355,85 °C y de 356,84 a 477,64 °C respectivamente, estos rangos de temperatura corresponden a la degradación de las hemicelulosas del polvo de tagua y del poliestireno.

Es importante notar que la primera pérdida de peso inició a baja temperatura 44,10 °C y terminó a 114,36 °C este rango de temperatura corresponde a la eliminación de agua si bien se conoce que la matriz tiene un bajo porcentaje de absorción de humedad el contenido de agua se debe al polvo de tagua que puede absorber agua del ambiente.

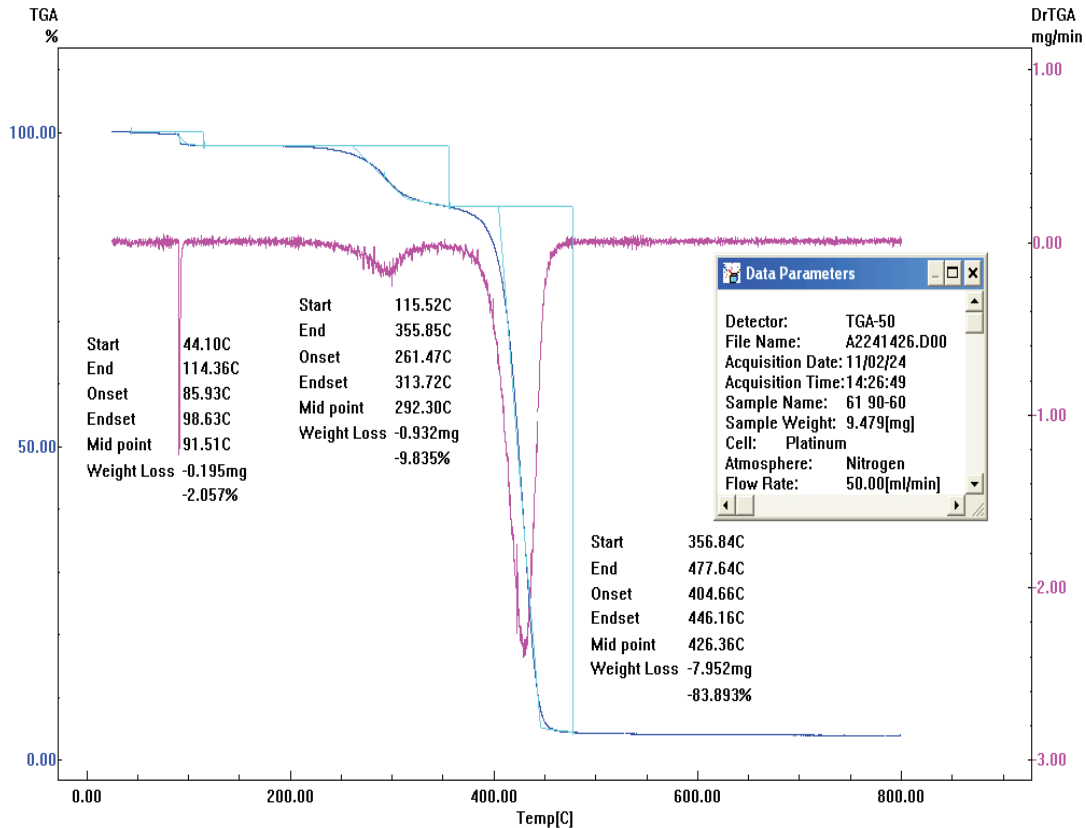


Figura 3.32. Curva de análisis TGA de la muestra de matriz de poliestireno con 10 % polvo de tagua malla 60

El termograma de la Figura 3.33 muestra tres pérdidas de peso la primera inició a 41,20 hasta 240,55 °C este rango de temperatura que sobrepasa los 110 °C indica que hubo eliminación de agua en la muestra y también degradación de otros componentes o la ruptura de algún tipo de enlace de los componentes del polvo de tagua.

La segunda pérdida de peso corresponde a la degradación de hemicelulosas del polvo de tagua con 11,41 %. Finalmente la degradación de celulosa y poliestireno en la tercera zona inició a 356,84 hasta 477, 64 °C con un porcentaje de 81,72 %.

Estos porcentajes de pérdida de peso al igual que los rangos de temperatura son similares al termograma de la muestra de 85 % poliestireno y 15 % de polvo de tagua malla 40.

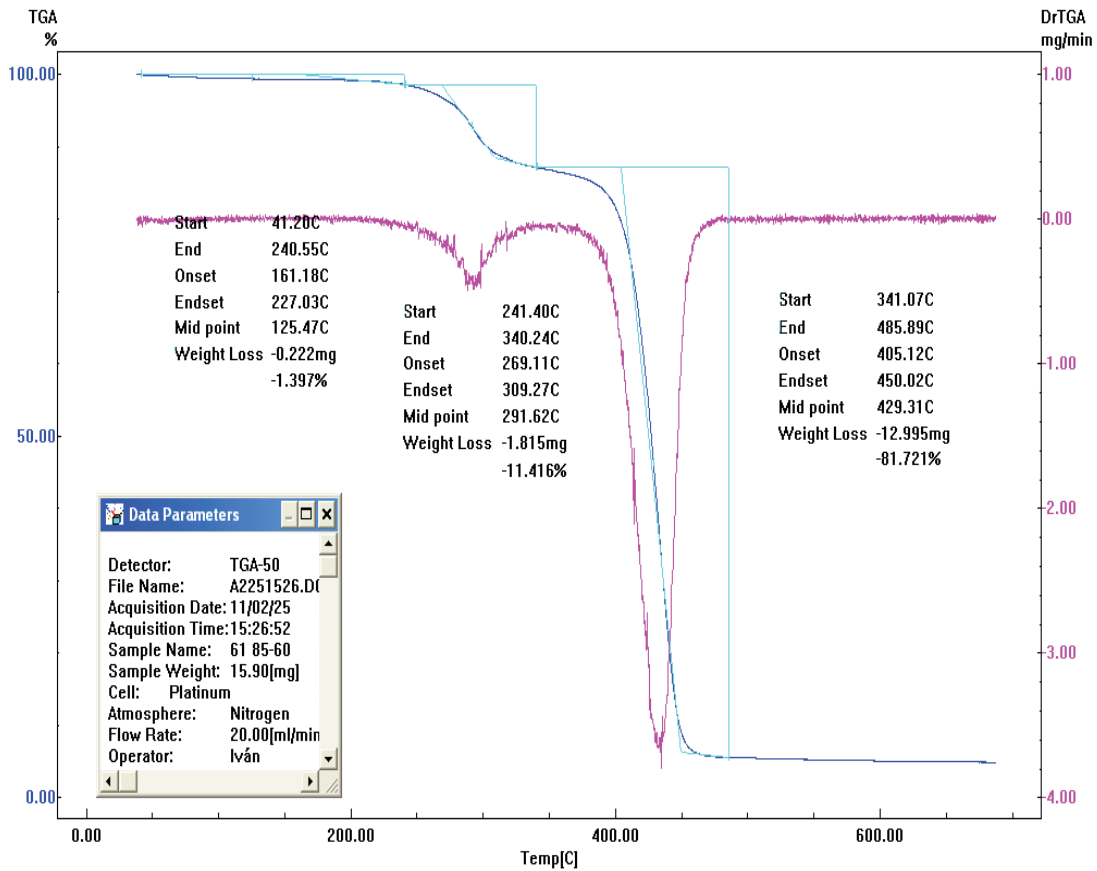


Figura 3.33. Curva de análisis TGA de la muestra de matriz de poliestireno con 15 % polvo de tagua malla 60

En la Figura 3.34 se observa el termograma para la muestra de 95 % poliestireno y 5 % de polvo de tagua malla 80, en esta gráfica se observan tres pérdidas de peso la primera inició a 67,91 hasta 101,69 °C, rango en el cual se estima existió la eliminación de agua, el porcentaje de pérdida de peso fue de 3,05 %.

La segunda pérdida de peso se dio en un rango de temperatura desde 102,86 °C a 352,7 °C con un 6,9 % correspondiente a la degradación de algunas hemicelulosas del polvo de tagua, así como la ruptura de ciertos enlaces de la matriz de poliestireno.

Finalmente la degradación de la celulosa y del poliestireno se produjo en un rango de temperatura desde 353,7 hasta 481,78 °C con un porcentaje de 87,23 % de pérdida de peso.

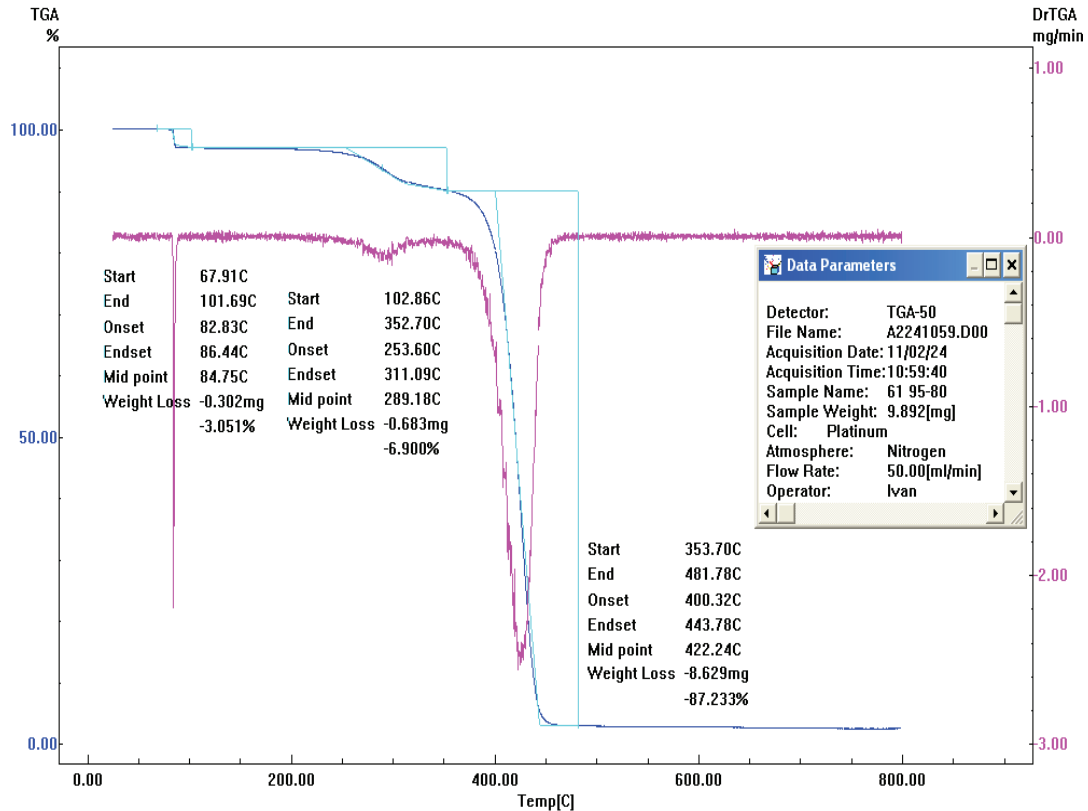


Figura 3.34. Curva de análisis TGA de la muestra de matriz de poliestireno con 5 % polvo de tagua malla 80

El termograma de la Figura 3.35 presentó tres pérdidas de peso, iniciando con un porcentaje 4,3 %, este valor es el mayor comparado con los otros casos con misma composición pero diferente tamaño de partícula, esta reducción de peso inició a 50,91 hasta 103,91 °C por lo que este valor corresponde a la eliminación de agua.

Al no encontrarse una tendencia que involucre el tamaño de partícula o la concentración como factores determinantes en cuanto a la pérdida de peso solo se afirmó una mayor presencia de humedad en esta muestra por absorción agua por parte del polvo de tagua.

La segunda pérdida de peso empezó a 174,81 °C y finalizó a 350,54 °C con un 9,65 % de pérdida de peso, este rango de temperaturas concernió a la degradación de hemicelulosas del polvo de tagua y finalmente la pérdida del

82,24 % de peso de la muestra en un rango de 351,54 a 483,91 °C perteneciente a la degradación de las celulosas y la matriz de poliestireno.

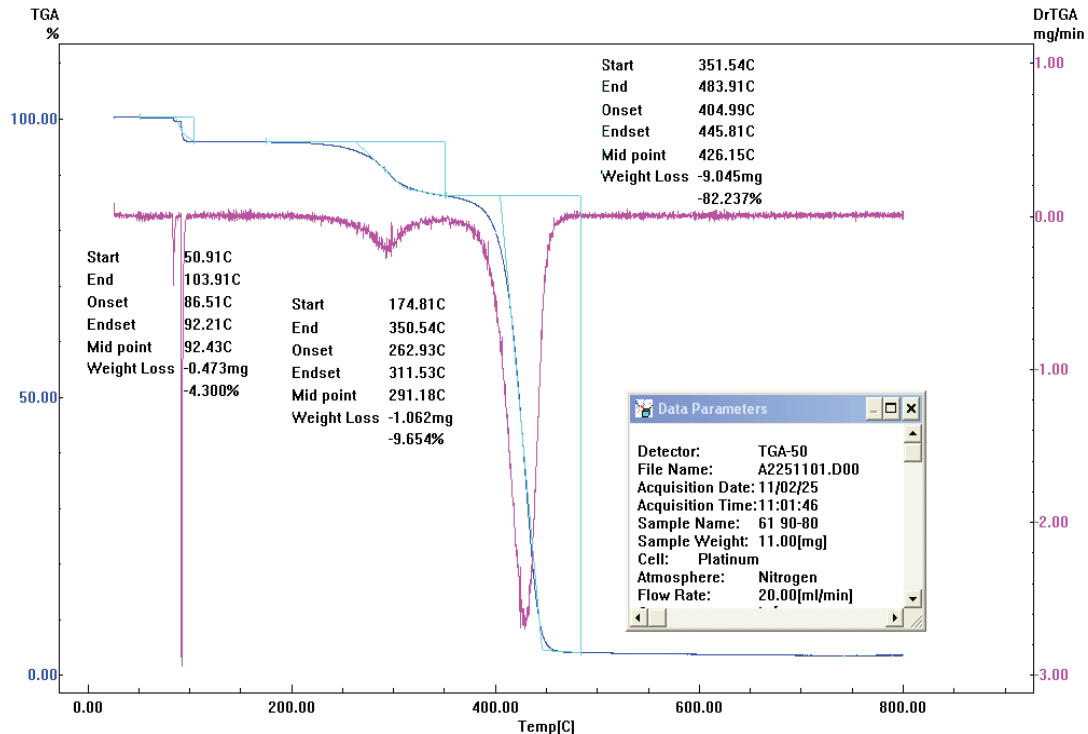


Figura 3.35. Curva de análisis TGA de la muestra de matriz de poliestireno con 10 % polvo de tagua malla 80

El termograma de la Figura 3.36 muestra tres pérdidas de peso, la primera desde los 32,98 °C hasta los 216,02 °C con una pérdida de menos del 1 % del peso de la muestra, por lo que se afirmó que esta muestra no contiene humedad y al alcanzar un temperatura mayor a 200 °C inicia la ruptura de ciertos enlaces tanto de la matriz como del polvo de tagua; este efecto se observa para los dos caso anteriores con la misma composición pero diferente malla.

Este comportamiento junto al análisis estadístico que se realizó a los valores del índice de fluidez indica que concentración es un factor importante ya que hay ruptura de ciertos enlaces del polvo de tagua y de la matriz que pudo iniciarse tanto en la extrusión como en la inyección por la cantidad de polvo de tagua añadido que genera un mayor esfuerzo cortante en estos procesos de transformación.

Los otros dos porcentajes de pérdidas de peso fueron de 10,53 y 82,31 %, para los rangos de temperatura comprendidos entre 217,19 a 337, 81 °C y de 338,99 a 498,86 °C respectivamente; estos valores que corresponden a la degradación de hemicelulosas, celulosas del polvo de tagua y de la matriz de poliestireno.

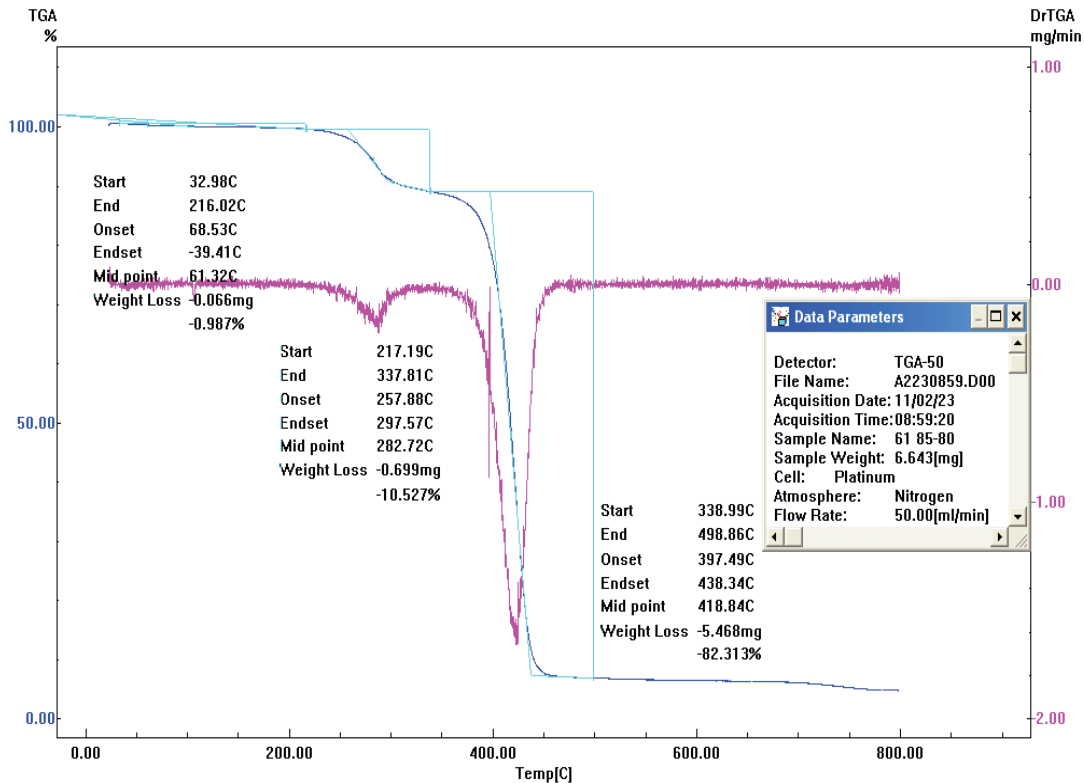


Figura 3.36. Curva de análisis TGA de la muestra de matriz de poliestireno con 15 % polvo de tagua malla 80

Al comparar los nueve termogramas se observó que la adición del polvo de tagua afecta la temperatura de degradación del material, ya que inicialmente existió una temperatura promedio de 290 °C donde hubo degradación de hemicelulosas de bajo peso molecular con un porcentaje no mayor al 12 % de pérdida de peso para la mayor concentración de polvo de tagua incorporada; también se debió considerar que este porcentaje incluye la pérdida de peso por ruptura de enlaces de la matriz. La temperatura promedio del último rango de pérdida de peso en todos los casos fue mayor por lo que se puede inferir que la adición de polvo de tagua produce cambios en las propiedades térmicas de este material.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- Los residuos de la elaboración de botones de tagua utilizada en la presente investigación muestra un contenido de 50,68 % de celulosa, 34,48 % de hemicelulosas y 1,35 % de lignina. El contenido de componentes minoritarios fue de 6,64 % de pentosanos y de 1,73 % de grasas, ceras y resinas. El contenido de humedad de los residuos de la elaboración de botones de tagua fue de 8,44 %; y la cantidad de ceniza fue de 1,16 %.
- En cuanto a la cantidad de solubles en agua caliente y en agua fría obtenidos bajo la norma ASTM D1110-84 se determinó que hay mayor cantidad de solubles en agua fría con 8,43 %, mientras que en agua caliente fue de 6,52 %. Al modificar el tiempo del ensayo a 6 horas se obtuvo mayor cantidad de solubles en agua caliente que en agua fría, debido a la presencia de hemicelulosas solubles en solventes polares.
- Los análisis de espectroscopía IF-TR denotó que la muestra corresponde al espectro de un material lignocelulósico cuyas bandas más prominentes se encontraron en las regiones de 3 540 a 3 200 cm^{-1} y 1 205 a 885 cm^{-1} , lo que denotó la presencia de grupos hidroxilos; además de vibraciones a 937 cm^{-1} , 872 cm^{-1} y 1250 cm^{-1} que reveló la existencia de manosa y pectinas.
- Los valores de la caracterización del poliestireno virgen fueron similares a los presentados por el proveedor, los valores experimentales para el índice de fluidez fue de 18,56 (g/10mim) y para la densidad fue de 1,05 (g/cm³).
- El análisis térmico DSC realizado al poliestireno determinó su temperatura de transición vítrea de 100,9 °C; mientras el ensayo termogravimétrico TGA estableció la temperatura inicial de degradación en 235,16 °C.

- El perfil de temperatura determinado para elaborar los pellets de poliestireno con polvo de tagua incorporado fue 100, 150, 146, 170, 180, 190, 190 °C para las siete zonas desde las tolvas hasta la boquilla
- Los resultados de la calibración de la tolva primaria y secundaria determinaron que para extruir 1kg/h de poliestireno el número de revoluciones necesarias de la tolva de alimentación primaria fue de 155 rpm y para obtener pellets de poliestireno con 5, 10 y 15 % de polvo de tagua se requirieron 3, 6,2 y 9,8 rpm respectivamente de la tolva secundaria.
- El tiempo de residencia del poliestireno en la extrusora fue de 9 minutos, y del polvo de tagua de 6 minutos; la baja estabilidad térmica de la tagua precisó que el polvo de tagua sea alimentado por la cuarta zona de la extrusora.
- La extrusión permitió una distribución regular del polvo de tagua en la matriz, debido a los problemas de alimentación del poliestireno. Además la distribución del polvo de tagua disminuyó conforme aumentó la concentración.
- Al incrementar el porcentaje de polvo de tagua incorporado disminuyó el índice de fluidez del material resultante.
- El perfil de temperatura para inyectar las probetas de poliestireno con polvo de tagua fueron: 160 °C para la zona de alimentación, 170 °C para la zona compactación, 180 °C para la zona de dosificación y 190 °C para la boquilla.
- La presión de inyección 1 y 2 fue de 65 % de la presión específica de inyección, mientras la presión de mantenimiento fue de 70 % para las probetas de poliestireno y las que contenían 5 % polvo de tagua indistintamente del número de malla empleado; en el caso de la mezclas con 10 y 15 % de polvo de tagua la presión de inyección 1 y 2 es de 70 % y la presión de mantenimiento es de 75 %.

- El tiempo de inyección, mantenimiento y enfriamiento fue de 4, 3 y 30 segundos respectivamente.
- El incremento del porcentaje de concentración de polvo de tagua añadido a la matriz aumentó la densidad del material mezclado.
- El tamaño de partícula del polvo de tagua fue el factor más relevante, este produjo un efecto significativo en las propiedades de tracción y flexión de las probetas obtenidas; al aumentar el tamaño de partícula disminuyeron los valores de esfuerzo de tracción y flexión.

4.2 RECOMENDACIONES

- Debido a la dificultad que se presentó en la caracterización química de la tagua se recomienda emplear un equipo HPLC con detector de índice de refracción y una columna Sugar Pack que permitan determinar el contenido y tipo de azúcares.
- Se recomienda un análisis del endospermo inmaduro de la tagua pues se presume la existencia de nutrientes que pueden ser aprovechados para otro tipo de industria.
- Se recomienda realizar ensayos de impacto y de dureza para verificar el efecto producido por la incorporación del polvo de tagua a la matriz de poliestireno.
- Se recomienda trabajar con un tamaño de partícula menor a la malla 80 para verificar una mejor ductilidad del material a menores tamaños de partículas.
- Se recomienda emplear un matriz más dúctil sea esta poletileno o polipropileno con la finalidad de analizar el efecto que produce la adición del polvo de tagua en cuanto a la elongación antes de la ruptura.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASTM D1102-84. (2013). Standard Test Method for Ash in wood. Recuperado de www.astm.org (Abril, 2014)
2. ASTM D1106-96. (2013). Standard Test Method for Acid-Insoluble Lignin in Wood. Recuperado de www.astm.org (Abril, 2014)
3. ASTM D1107-96. (2013). Standard Test Method for Ethanol-Toluene Solubility of Wood. Recuperado de www.astm.org (Abril, 2014)
4. ASTM D1109-84. (2013). Standard Test Method for 1% Sodium Hydroxide Solubility of Wood. Recuperado de www.astm.org (Abril, 2014)
5. ASTM D1110-84. (2013). Standard Test Method for Water Solubility of Wood. Recuperado de www.astm.org (Abril, 2014)
6. ASTM D4442-07. (2007). Standard Test Methods For Direct Moisture Content Measure of Wood and Wood Base Materials. Recuperado de www.astm.org (Abril, 2014)
7. Barfod, A. (1991). A monographic study of the subfamily Phytelephantoideae (Arecaceae). Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/256402051_A_monographic_study_of_the_subfamily_Phytelephantoideae_Arecacea (Mayo, 2016)
8. Barroso, S., Gil, J., y Camacho, A. (2008). Introducción a conocimiento de los materiales y sus aplicaciones. Recuperado de <http://site.ebrary.com/bvirtual.epn.edu.ec/lib/epnsp/detail.action?docID=10559600> (Agosto, 2016)
9. Beltrán Rico, M., y Marcilla Gomis, A. (2012). Tecnología de los plásticos Procesado y Propiedades. Barcelona: Universidad de Alicante

10. Besednjak, A. (2005). Materiales compuestos. Recuperado de https://books.google.com.ec/books?id=d0JpBgAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false (Junio, 2016)
11. Birley, A., Heath, R., y Scott, M. (1994). *Plastics materials, properties and applications*. doi:10.1007/978-1-4615-3664-2
12. Bledzki, A., Sperber, V., y Faruk, O. (2002). *Natural Wood and Fibre Reinforcement in Polymers*. Recuperado de <http://site.ebrary.com.bvirtual.epn.edu.ec/lib/epn/detail.action?docID=10236826> (Marzo, 2016)
13. Brieva, M. A. (2011). *Estudio de tensiones residuales mediante fotoelasticidad en piezas de poliestireno cristal moldeadas por inyección*. (Disertación de proyecto de titulación) Universidad de Cartagena, Cartagena de indias D.T.Y.C, Colombia
14. Camuña, J. (2013). *Acondicionado de materiales termoplásticos para su transformación*. Recuperado de <http://site.ebrary.com.bvirtual.epn.edu.ec/lib/epnsp/detail.action?docID=11126274> (Abril, 2016)
15. Carraher, C. (2005). *Polymer Chemistry (Sexta ed.)*. Florida: Marcel Dekker, Inc.
16. Chávez-Sifontes, M., y Domine, M. (Octubre de 2013). *Lignina, Estructura y Aplicaciones: Métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial*. Recuperado de http://www.exeedu.com/publishing.cl/av_cienc_ing/2013/Vol4/Nro4/3-ACI1184-13-full.pdf (Junio, 2015)

17. Clay, J., y Clement, C. (mayo de 1993). Selected species and strategies to enhance income generation from amazonian forest. Recuperado de Food and Agriculture Organization of the United Nations: <http://www.fao.org/docrep/019/v0784e/v0784e.pdf> (Junio, 2015)
18. Cuervo, L., Folch, J., y Quiroz , R. (2009). Lignocelulosa como fuente de azúcares para la producción de etanol. *BioTecnología*, 13(3), 11-24. Obtenido de http://www.smbb.com.mx/revista/Revista_2009_3/Lignocelulosa.pdf. (Junio, 2015)
19. Espinosa, E., y Mann, M. (1999). Guia para la identificación del marfil y los sustitutos del marfil. Oregon, Estados Unidos de América: National Fish & Wildlife. Recuperado de https://cites.org/sites/de_fault/files/esp/resources/pub/S-Ivory-guide.pdf (Mayo de 2016)
20. García, J. (1995). Nuevas poli(eter amida)s alifático aromáticas. Síntesis, caracterización y estudio de propiedades. Proyecto de titulación. Madrid, Universidad Complutense de Madrid, España. doi:1-4135-8013-0
21. García, M. (2009). Fundamentos de biología básica. doi:<http://dx.doi.org/10.6035/Universitas.31>
22. Groover, M. P. (Enero de 2007). Fundamentos de la manufactura moderna: materiales procesos y sistemas. Obtenido de <http://site.ebrary.com/bvirtual.epn.edu.ec/lib/epnsp/reader.action?docID=10515063> (Mayo, 2016)
23. Haiping, Y., Rong, Y., Hanping, C., Dong Ho, L., y Chuguang, Z. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Science Direct*, 86, 1781-1788. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013> (Mayo, 2016)

24. Jara, V. (2015). Diseño de una Planta Piloto para la Obtención de Granza de Madera Plástica a Partir de Polietileno Reciclado con Partículas Lignocelulósicas (Aserrín). Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. Obtenido de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/12652> (Mayo, 2016)
25. Koziol, M. J. (1993). *Phytelephas aequatorialis* in Human and Animal Nutrition. *Economic Botany*, 47(401-407).
26. Lopez, M. (2013). Transformación de materiales plásticos (1 ed.). Andalucía, España: IC Editorial.
27. Martinez, J., y Silva, E. (2015). Bioenergía, conversión y sustentabilidad. Bogota, Colombia: CYTED.
28. Miravete, A. (2012). Materiales Compuestos I. Recuperado de <http://site.ebrary.com.bvirtual.epn.edu.ec/lib/epnsp/reader.action?docID=11072484&ppg=4>. (Mayo, 2016)
29. Montalvo Soberón, L. A. (Enero de 2007). Plásticos industriales y su procesamiento. Obtenido de <http://site.ebrary.com.bvirtual.epn.edu.ec/lib/epnsp/reader.action?docID=10165743> (Mayo, 2016)
30. Newel, J. (2010). Ciencia de materiales aplicaciones en ingeniería. Alfaomega Grupo Editor. Recuperado de <http://site.ebrary.com.bvirtual.epn.edu.ec/lib/epnsp/reader.action?docID=10740901&ppg=5> (Mayo, 2016)
31. Paniagua, R., Nistal, M., Sesma, P., Álvarez Manuel, Fraile, B., Anadón, B., y Sáez, F. J. (2007). Citología e histología vegetal y animal (4ta ed.). Madrid, España: Mc GRAW-HILL INTERAMERICANA.

32. Paz, F. (2008). Determinación de la composición química de la madera obtenida del primer clareo en árboles de melina (*Gmelina arborea* Roxb.), de una plantación proveniente del departamento de Izabal. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
33. Pesok, J. (2012). Introducción a la tecnología textil. Recuperado de <http://site.ebrary.com.bvirtual.epn.edu.ec/lib/epnsp/detail.action?docID=10877548> (Mayo, 2016)
34. Plastics Europe. (2015). An analysis of European plastics. Ponencia presentada en el Congreso de Estudiantes de Ingeniería Química de la UA. Bruselas-Belgica. Recuperado de <http://www.plasticseurope.org/Document/plasticstheFacts2014.aspx?Page=DOCUMENT&FoIID=2> (Mayo, 2016)
35. Pratyosh, S., y Brett, P. (2012). Advances in Enzyme Biotechnology. doi:10.1007/978-81-322-1094-8
36. PROECUADOR Instituto de Promoción de Exportaciones. (Marzo de 2013). Análisis del Sector de Artesanías 2013. Ecuador. Recuperado de http://www.proecuador.gob.ec/wp-content/uploads/2013/08/-1303-BOTONES_DE-TAGUA-CHINA-R0042.pdf (Enero de 2016)
37. Rutiaga, J., Weiderpass, E., y Strobel, C. (2000). Composición química del duramen de la madera de *Quercus candicans* Neé (Vol. 6). Xalapa, México: Instituto de Ecología, A.C.
38. Salazar Villón, M. B. (2006). Evaluación de pinturas arquitectónicas de tipo latex con fibras naturales de tagua y cabuya. Recuperado de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/13831/3/salazar%20villon.pdf> (Enero de 2016)

39. Saldarriaga, J., Zuluaga, R., y Gañan, P. (2007). Caracterización de polisacaridos naturales obtenidos a partir de fuentes colombianas. *Revista Investigaciones Aplicadas*, 2(2), 6-12. Recuperado de <http://convena.upb.edu.co/~revistaaplicada> (Mayo, 2016)
40. Sazanov, Y., y Gribanov, A. (2010). Thermochemistry of lignin. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 83(2), 175-194. doi:10.1134/S1070427210020011
41. Seguí, J. M. (2011). *Biología y biotecnología reproductiva de las plantas*. Madrid: Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia. Recuperado de <http://site.ebrary.com.bvirtual.epn.edu.ec/lib/epnsp/reader.action?docID=10692773> (Mayo, 2016)
42. Solís, M., Lisperguer, J., y Arencibia, L. (2005). Compuestos mixtos de poliestireno y pino radiata. *Revista Cubana de Química*, XVII(3). Recuperado de <http://site.ebrary.com.bvirtual.epn.edu.ec/lib/epnsp/reader.action?docID=10307043> (Mayo, 2016)
43. Southgate, D., Coles, M., y Salazar, P. (Noviembre de 1995). The Environmental and Natural Resources Policy And Training Project. Forestry and the Environment: Economic Perspectives Conference. Obtenido de *Can We Save Tropical Forest by Harvesting Non-Timber Products*. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/23510275> (Enero, 2016)
44. Suarez, A., Del Rio, J., y Bolaños, J. (2010). Composición química dural de sus ligninas e diversos materiales lignocelulosicos de interes industrial y análisis estruct. Memoria del proyecto desarrollado durante el período de investigación del Master en “Estudios Avanzados en Química”. Sevilla, España: Pepijn, Prinsen

45. Valencia, R., Montufar, R., Navarrete, H., y Balslev, H. (2013). Palmas Ecuatorianas biología y uso sostenible. Quito, Ecuador: Publicaciones del Herbario Qca de la Pontificia universidad católica del Ecuador. Recuperado de [http://www.puce.edu.ec/portal /content/Publicaciones/546;jsessionid=BFDFC77C6E955586CEF336406C044497.node0?link=oln30.redirect](http://www.puce.edu.ec/portal/content/Publicaciones/546;jsessionid=BFDFC77C6E955586CEF336406C044497.node0?link=oln30.redirect) (Enero, 2016)

46. Villamar, D. (2013). Caracterización de materiales compuestos lignocelulósicos obtenidos mediante extrusión. Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. Recuperado de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/6164> (Enero, 2016)

ANEXOS

ANEXO I

MOLDES DE LAS PLACAS PARA LA EVALUACIÓN DE
DISPERSIÓN Y DISTRIBUCIÓN

Figura AI. 1. Fotografías de las placas tipo *flash* empleadas para la elaboración de las placas de poliestireno y polvo de tagua

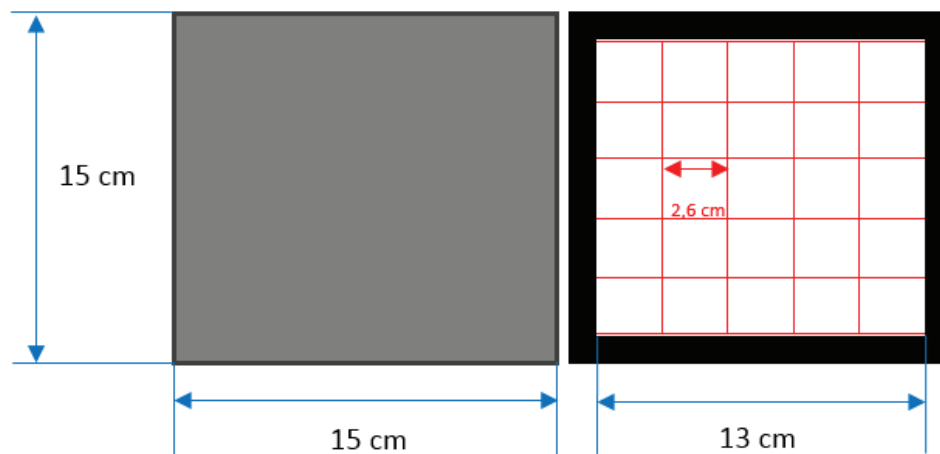


Figura AI. 2. Dimensiones del molde empleado para la elaboración de las placas de poliestireno y polvo de tagua para evaluar dispersión y distribución

ANEXO II

**PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO DE LA INYECTORA BOY
30D**

La Tabla AII.1 muestra las condiciones fijas empleadas para la calibración con poliestireno de la inyectora BOY 30D.

Tabla AII. 1. Condiciones de funcionamiento del equipo de inyección para inyectar poliestireno a un molde de probetas

Datos generales de ajuste de la Inyectora BOY 30D		
Descripción	Cantidad	Unidad
Material	<i>poliestireno</i>	
Molde	<i>ASTM 638-10</i>	
Temperatura del aceite	<i>40-50</i>	
Presión específica de inyección	<i>1 810</i>	bar
Temperatura de pre secado del material	<i>70</i>	°C
Tiempo de pre secado del material	<i>3</i>	h
Color	-	-
Presión de expulsión (S60D)	<i>25</i>	%
Espesor de colchón (B54W)	<i>5</i>	mm
Distancia de conmutación (B502W)	<i>15</i>	mm
Distancia de dosificación (B53W)	<i>45</i>	mm
Velocidad de inyección (S502G & S50G)	<i>70</i>	%
Velocidad de plastificación (S53G)	<i>50</i>	%
Velocidad de expulsión (S60G)	<i>60</i>	%

ANEXO III

PROBETAS INYECTADAS A DISTINTAS PRESIONES

Ensayos realizados para determinar la presión de inyección.

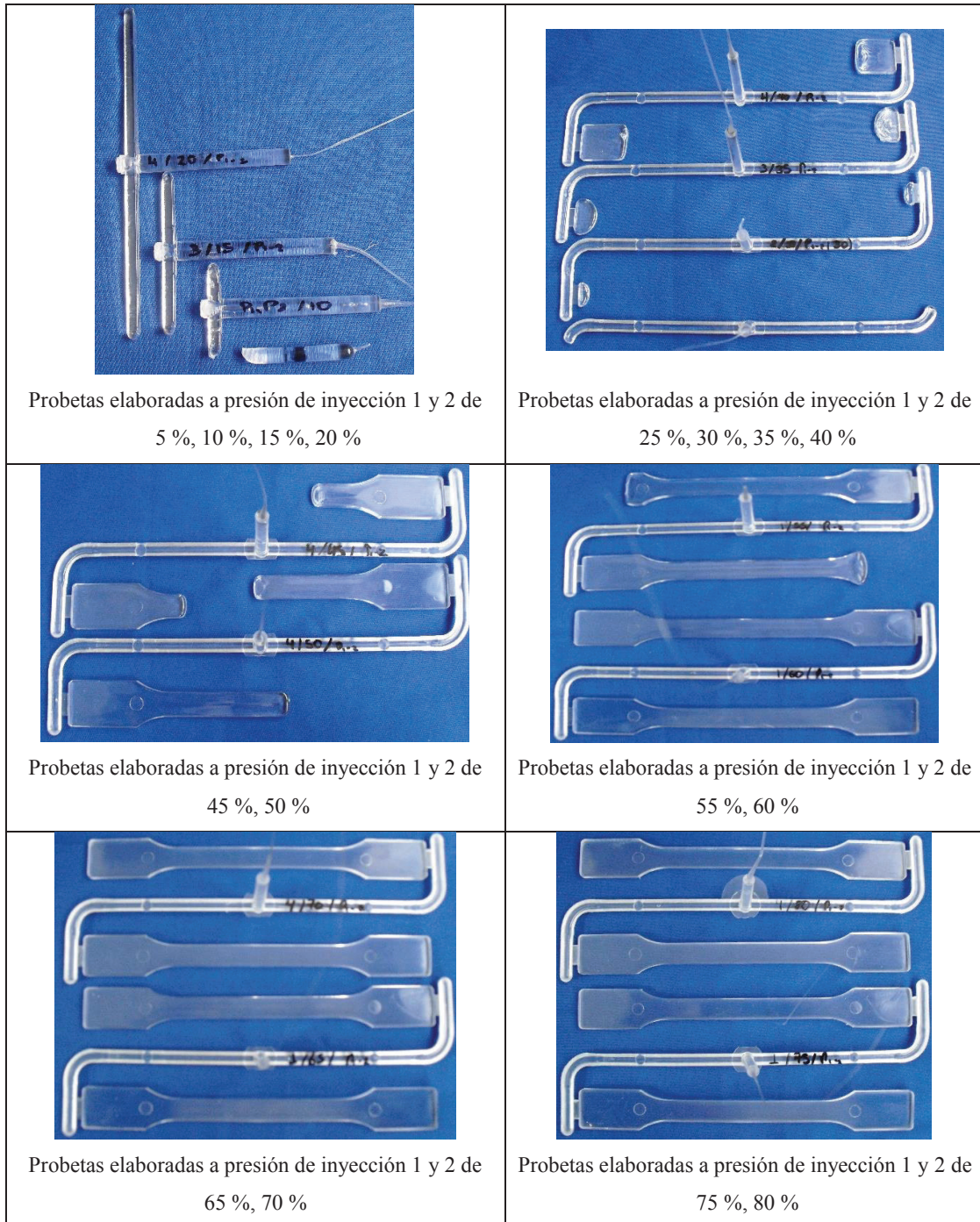


Figura AIII. 1. Probetas elaboradas mediante inyección a diferentes presiones desde 5 % a 80 % de la presión específica de inyección

ANEXO IV

DETERMINACIÓN DE LA PRESIÓN DE MANTENIMIENTO

La Tabla AIV.1 muestra los pesos de inyección a diferentes presiones tanto de inyección 1 y 2 como de mantenimiento.

Tabla AIV. 1. Determinación de la presión de mantenimiento para las probetas de poliestireno manteniendo constante el tiempo de enfriamiento a 30 segundos y tiempo de mantenimiento en 3 segundos

Nº de pieza	Presión de inyección 1 y 2 (%)	Presión de mantenimiento (%)	Peso de inyección (g)	Peso promedio de inyección (g)	Observaciones
1	60	0	28,88	28,70	Pieza incompleta
2	60	0	28,52		Pieza incompleta
3	65	0	28,98	28,54	Pieza incompleta
4	65	0	28,10		Pieza incompleta
5	70	0	28,37	28,44	Pieza incompleta
6	70	0	28,51		Pieza incompleta
7	75	0	28,54	28,43	Pieza incompleta
8	75	0	28,32		Pieza incompleta
9	80	0	28,52	28,51	Pieza completa
10	80	0	28,49		Rebabas
11	65	65	28,32	28,88	Pieza completa
12	65	65	29,44		Pieza completa
13	65	70	29,24	29,26	Pieza completa
14	65	70	29,28		Pieza completa
15	65	75	29,26	29,20	Rebabas
16	65	75	29,14		Rebabas
17	70	70	29,62	29,71	Pieza completa
18	70	70	29,80		Pieza completa
19	70	75	30,19	30,04	Pieza completa
20	70	75	29,88		Pieza completa
21	70	80	29,77	30,40	Rebabas
22	70	80	31,02		Rebabas
23	75	85	32,38	32,33	Pieza completa
24	75	85	32,27		Pieza completa
25	75	75	31,06	30,71	Rebabas
26	75	75	30,36		Rebabas
27	75	85	32,41	32,34	Rebabas
28	75	85	32,26		Rebabas

ANEXO V

PROBETAS PARA ENSAYO DE TRACI3N Y FLEXI3N

Las dimensiones de las probetas que se obtuvieron mediante inyecci3n se encuentran en la Figura AV.1.

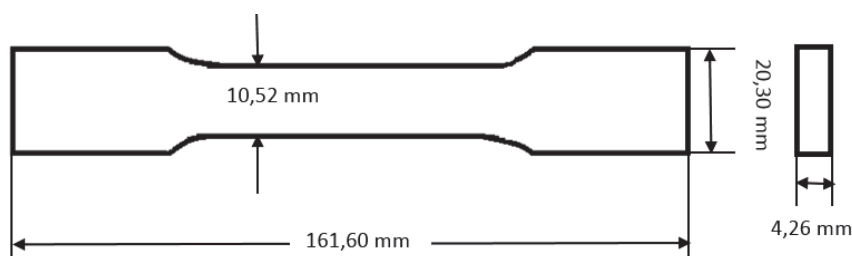


Figura AV. 1. Dimensiones de las probetas elaboradas mediante inyecci3n para el ensayo de tracci3n

En vista que no se dispona de un molde para elaborar las probetas de flexi3n se procedi3 a cortar las probetas inyectadas de acuerdo a las especificaciones que se encuentran detalladas en la norma ASTM D790-10 "Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials". La probeta debe tener un lapso de apoyo, 16 veces de su profundidad y el extremo debe ser el 10 % del intervalo de apoyo.

$$\text{Profundidad de la probeta} = 4,26 \text{ mm}$$

$$\text{Lapso de apoyo} = 16 \times 4,26 \text{ mm} = 68,16 \text{ mm}$$

$$\text{Extremos} = 6,81 \text{ mm}$$

$$\text{Longitud total de la probeta} = 81,78 \text{ mm}$$

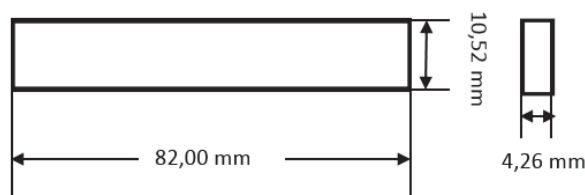


Figura AV. 2. Dimensiones de las probetas para el ensayo de flexi3n

ANEXO VI

RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE ESPECTROSCOPIA FT-IR PARA LA MUESTRA DE POLVO DE TAGUA

La Figura VI.1 muestra los espectros superpuestos tanto para la muestra original como de la muestra de celulosa obtenida después de ser tratada bajo la norma TAPPI T17 m-55.

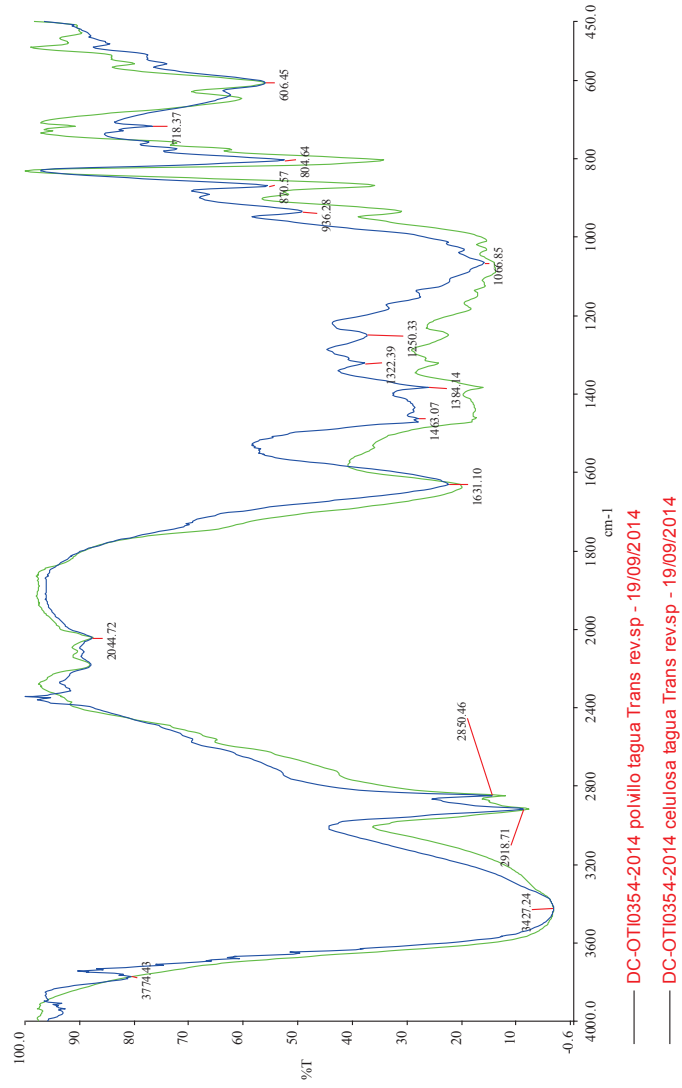


Figura VI. 1 Espectros de las muestras de los residuos de tagua (azul) y de la muestra después de ser tratada bajo el ensayo de determinación de celulosa (verde)

ANEXO VII

HOJA DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL POLIESTIRENO VIRGEN



U249
Poliestireno Cristal

Características del Producto

- Alta fluidez.
- Excelente brillo y transparencia.
- Adecuado para coextrusión y moldeo en múltiples cavidades.
- Aprobado para uso en contacto con alimento⁽¹⁾

Propiedades	ASTM				
	Norma	Inglés		Internacional	
		Unidades	Valores	Unidades	Valores
Índice de Fluidez ⁽²⁾	D-1238	g/10min	19	g/10min	19
Módulo de elasticidad (tracción)	D-638	psi	450.000	Mpa	3.200
Resistencia a la tracción (ruptura)	D-638	psi	5.800	Mpa	40
Elongación (ruptura)	D-638	%	1,5	%	1,5
Resistencia al impacto IZOD ⁽³⁾ @ 23°C	D-256/A	Lbf/ft/in	0,35	J/m	19
Punto de fusión VICAT ⁽⁴⁾ (B/50)	D-1525	°C	88	°C	88
Temperatura de inflexión (carga) ⁽⁵⁾ (A) @ 264psi / 1,82 MPa	D-648	°C	78	°C	73
Densidad	D-792	g/cm ³	1,04	g/cm ³	1,04
Absorción de agua	D-570	%	0,03	%	0,03

Clasificación conforme UL - 94HB

1. *Resoluciones 51 e 52 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (105/99 - Brazil e Mercosur) e FDA USA 21 CFR 177.1640.

2. Ensayo bajo la condición: 200°C / 5 kg.

3. Cuerpo de prueba moldeado por inyección de 63/12,6/3,5 mm (C/A/E); Rayo de entalle de 0,25R +/- 0,05; Profundidad 2,54 mm.

4. Testeo efectuado con carga de 5kg e temperatura creciente 50°C /h.

5. Cuerpo de prueba moldeado por inyección de 128/13/6,3 mm (C/A/E). Carga de teste de 264 psi.

Figura VII. 1. Hoja de especificaciones del poliestireno cristal de propósito general entregado por el proveedor

ANEXO VIII

RESULTADOS DE LA DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DEL POLIESTIRENO VIRGEN.

En la Tabla AVIII.1 se detallan los valores obtenidos para determinar la densidad de acuerdo con la ecuación [2.9].

Tabla AVIII. 1. Resultados de la determinación de densidad de las probetas inyectadas a diferentes concentraciones y tamaño de partícula de polvo de tagua con poliestireno

	A	B	Densidad del líquido de inmersión	Densidad del sólido	Promedio
PS e 1	3,658	0,163	0,998	1,045	
PS e 2	3,582	0,156	0,998	1,043	
PS e 3	3,654	0,160	0,998	1,044	1,044
PS e 95-40-1	3,750	0,212	0,998	1,058	
PS e 95-40-2	3,659	0,233	0,998	1,066	
PS e 95-40-3	3,666	0,233	0,998	1,066	1,063
PS e 90-40-1	3,705	0,287	0,998	1,082	
PS e 90-40-2	3,657	0,285	0,998	1,082	
PS e 90-40-3	3,752	0,284	0,998	1,080	1,081
PS e 85-40-1	3,863	0,342	0,998	1,095	
PS e 85-40-2	3,937	0,354	0,998	1,097	
PS e 85-40-3	3,775	0,340	0,998	1,097	1,096
PS e 95-60-1	3,779	0,215	0,998	1,058	
PS e 95-60-2	3,666	0,218	0,998	1,061	
PS e 95-60-3	3,643	0,216	0,998	1,061	1,060
PS e 90-60-1	3,816	0,287	0,998	1,079	
PS e 90-60-2	3,673	0,290	0,998	1,084	
PS e 90-60-3	3,714	0,279	0,998	1,079	1,081
PS e 85-60-1	3,871	0,346	0,998	1,096	
PS e 85-60-2	3,849	0,344	0,998	1,096	
PS e 85-60-3	3,914	0,351	0,998	1,096	1,096
PS e 95-80-1	3,638	0,223	0,998	1,063	
PS e 95-80-2	3,755	0,227	0,998	1,062	
PS e 95-80-3	3,735	0,226	0,998	1,062	1,063
PS e 90-80-1	3,845	0,286	0,998	1,078	
PS e 90-80-2	3,709	0,277	0,998	1,079	
PS e 90-80-3	3,719	0,275	0,998	1,078	1,078
PS e 85-80-1	3,714	0,336	0,998	1,097	
PS e 85-80-2	3,794	0,340	0,998	1,096	
PS e 85-80-3	3,753	0,334	0,998	1,096	1,096

ANEXO IX

PERFIL DE TEMPERATURA DE LA EXTRUSORA.

El perfil de temperatura de la extrusora para procesar el poliestireno con polvo de tagua se determinó con varios ensayos, con extrusión solo de poliestireno; se verificó que el extruido fluya sin dificultad. Al agregar el polvo de tagua se observó degradación por fue necesario disminuir el perfil de temperatura de la extrusora a para evitar la degradación de la misma.

Tabla AIX. 1. Perfil de temperatura que se empleó en el procesamiento de poliestireno y poliestireno con polvo de tagua

Zonas de calentamiento de la extrusora	Valores probados							Valores definitivos	
	Perfil de temperatura 1 solo poliestireno (°C)	Perfil de temperatura 2 solo poliestireno (°C)	Perfil de temperatura 3 solo poliestireno (°C)	Perfil de temperatura 4 solo poliestireno (°C)	Perfil de temperatura poliestireno con adición del polvo de tagua (°C)	Perfil de temperatura poliestireno con adición del polvo de tagua (°C)	Perfil de temperatura final solo poliestireno (°C)	Perfil de temperatura poliestireno con adición del polvo de tagua (°C)	
Zona 1	70	75	135	145	110	110	110	100	
Zona 2	130	100	165	175	150	140	140	150	
Zona 3	140*	130*	145*	148*	146*	146*	146*	146*	
Zona 4	160	140	175	185	170	170	170	170	
Zona 5	165	160	180	195	185	185	185	180	
Zona 6	170	170	195	200	195	200	200	190	
Zona 7	175	180	200	200	195	200	200	190	

* Temperatura máxima alcanzada en la zona 3

ANEXO X

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE FLEXIÓN.

Tabla AX. 1. Valores máximos de extensión y fuerza de probetas de poliestireno virgen

Probeta	PS virgen		
	Tiempo (s)	Extensión (mm)	Fuerza (N)
1	0,00	2,43	0,08
	217,90	9,70	120,51
	217,90	7,26	120,43
2	0,00	2,40	0,10
	222,40	9,81	124,87
	222,40	7,41	124,78
3	0,00	2,47	0,13
	197,86	9,07	116,28
	197,86	6,59	116,15
4	0,00	2,37	0,11
	211,82	9,42	129,49
	211,82	7,06	129,37
5	0,00	2,43	0,11
	220,92	9,80	128,20
	220,92	7,36	128,09
Promedio	214,18	7,14	123,76
Desviación estándar	9,98	0,33	5,48

Tabla AX. 2. Valores máximos de extensión y fuerza de probetas de poliestireno 95 % y polvo de tagua malla 40

Probeta	Poliestireno 95 % - tagua 5 %; malla 40		
	Tiempo (s)	Extensión (mm)	Fuerza (N)
1	0,00	2,47	0,09
	210,02	9,47	117,93
	210,02	7,00	117,84
2	0,00	2,43	0,09
	199,12	9,07	114,00
	199,12	6,64	113,90
3	0,00	2,46	0,10
	150,14	7,46	83,64
	150,14	5,00	83,54
4	0,00	2,50	0,09
	215,38	9,67	111,23
	215,38	7,18	111,15
5	0,00	2,52	0,13
	202,24	9,26	113,60
	202,24	6,74	113,48
Promedio	195,38	6,51	107,98
Desviación estándar	26,08	0,86	13,87

Tabla AX.3. Valores máximos de extensión y fuerza de probetas de poliestireno 90 % y polvo de tagua malla 40

Poliestireno 90 % - tagua 10 %; malla 40				
Probeta	Tiempo (s)	Extensión (mm)	Fuerza (N)	
1	0,00	2,54	0,09	
	208,26	9,49	104,49	
	208,26	6,94	104,40	
2	0,00	2,50	0,11	
	202,34	9,24	106,74	
	202,34	6,74	106,63	
3	0,00	2,54	0,11	
	189,96	8,87	104,54	
	189,96	6,33	104,43	
4	0,00	2,63	0,14	
	187,52	8,88	102,50	
	187,52	6,25	102,36	
5	0,00	2,48	0,11	
	186,00	8,67	105,87	
	186,00	6,20	105,76	
Promedio	194,82	6,49	104,72	
Desviación estándar	9,89	0,32	1,61	

Tabla AX.4. Valores máximos de extensión y fuerza de probetas de poliestireno 85 % y polvo de tagua malla 40

Poliestireno 85 % - tagua 15 %; malla 40				
Probeta	Tiempo (s)	Extensión (mm)	Fuerza (N)	
1	0,00	2,33	0,07	
	184,16	8,47	112,29	
	184,16	6,14	112,22	
2	0,00	2,49	0,11	
	189,12	8,80	109,56	
	189,12	6,30	109,45	
3	0,00	2,42	0,10	
	183,48	8,53	111,04	
	183,48	6,12	110,94	
4	0,00	2,39	0,11	
	172,42	8,13	109,17	
	172,42	5,75	109,07	
5	0,00	2,31	0,07	
	187,50	8,56	109,80	
	187,50	6,25	109,73	
Promedio	183,34	6,11	110,28	
Desviación estándar	6,53	0,22	1,29	

Tabla AX. 5. Valores máximos de extensión y fuerza de probetas de poliestireno 95 % y polvo de tagua malla 60

Poliestireno 95 % - tagua 5 %; malla 60				
Probeta	Tiempo (s)	Extensión (mm)	Fuerza (N)	
1	0,00	0,00	0,31	
	274,96	9,17	119,10	
	274,96	9,17	118,79	
2	0,00	2,58	0,13	
	222,24	9,99	122,58	
	222,24	7,41	122,45	
3	0,00	2,59	0,11	
	222,70	10,01	121,40	
	222,70	7,42	121,29	
4	0,00	2,55	0,15	
	220,76	9,91	122,66	
	220,76	7,36	122,52	
5	0,00	2,41	0,11	
	200,22	9,08	125,54	
	200,22	6,67	125,43	
Promedio	228,18	7,61	122,10	
Desviación estándar	27,80	0,93	2,40	

Tabla AX. 6. Valores máximos de extensión y fuerza de probetas de poliestireno 90 % y polvo de tagua malla 60

Poliestireno 90 % - tagua 10 %; malla 60				
Probeta	Tiempo (s)	Extensión (mm)	Fuerza (N)	
1	0,00	2,54	0,12	
	180,58	8,56	107,75	
	180,58	6,02	107,63	
2	0,00	2,52	0,14	
	204,88	9,34	120,14	
	204,88	6,83	120,01	
3	0,00	2,51	0,09	
	205,56	9,36	118,70	
	205,56	6,85	118,62	
4	0,00	2,41	0,10	
	188,74	8,70	121,89	
	188,74	6,29	121,79	
5	0,00	2,54	0,10	
	201,72	9,26	114,44	
	201,72	6,72	114,34	
Promedio	196,30	6,54	116,48	
Desviación estándar	11,10	0,37	5,66	

Tabla AX. 7. Valores máximos de extensión y fuerza de probetas de poliestireno 85 % y polvo de tagua malla 60

Poliestireno 85 % - tagua 15 %; malla 60				
Probeta	Tiempo (s)	Extensión (mm)	Fuerza (N)	
1	0,00	2,53	0,13	
	191,76	8,92	114,15	
	191,76	6,39	114,01	
2	0,00	2,47	0,10	
	197,52	9,05	117,36	
	197,52	6,58	117,26	
3	0,00	2,38	0,11	
	203,92	9,18	123,75	
	203,92	6,80	123,64	
4	0,00	2,44	0,12	
	209,28	9,42	120,97	
	209,28	6,98	120,84	
5	0,00	2,48	0,15	
	192,80	8,90	117,75	
	192,80	6,43	117,60	
Promedio	199,06	6,63	118,67	
Desviación estándar	7,47	0,25	3,68	

Tabla AX. 8. Valores máximos de extensión y fuerza de probetas de poliestireno 95 % y polvo de tagua malla 80

Poliestireno 95 % - tagua 5 %; malla 80				
Probeta	Tiempo (s)	Extensión (mm)	Fuerza (N)	
1	0,00	2,79	0,15	
	207,94	9,72	103,66	
	207,94	6,93	103,52	
2	0,00	2,52	0,16	
	200,60	9,20	127,22	
	200,60	6,69	127,06	
3	0,00	2,60	0,16	
	201,80	9,32	122,91	
	201,80	6,73	122,76	
4	0,00	2,56	0,10	
	204,88	9,39	126,57	
	204,88	6,83	126,46	
5	0,00	2,51	0,12	
	206,34	9,39	132,03	
	206,34	6,88	131,92	
Promedio	204,31	6,81	122,34	
Desviación estándar	3,07	0,10	11,02	

Tabla AX. 9. Valores máximos de extensión y fuerza de probetas de poliestireno 90 % y polvo de tagua malla 80

Poliestireno 90 % - tagua 10 %; malla 80				
Probeta	Tiempo (s)	Extensión (mm)	Fuerza (N)	
1	0,00	2,63	0,10	
	204,48	9,44	121,35	
	204,48	6,81	121,25	
2	0,00	0,00	0,12	
	270,02	9,00	122,00	
	270,02	9,00	121,87	
3	0,00	0,00	0,16	
	283,80	9,46	120,14	
	283,80	9,46	119,98	
4	0,00	0,00	0,19	
	273,30	9,11	126,60	
	273,30	9,11	126,42	
5	0,00	0,00	0,22	
	271,08	9,04	125,44	
	271,08	9,04	125,22	
Promedio	260,54	8,68	122,95	
Desviación estándar	31,81	1,06	2,74	

Tabla AX. 10. Valores máximos de extensión y fuerza de probetas de poliestireno 85 % y polvo de tagua malla 80

Poliestireno 85 % - tagua 15 %; malla 80				
Probeta	Tiempo (s)	Extensión (mm)	Fuerza (N)	
1	0,00	0,00	0,25	
	268,46	8,95	117,19	
	268,46	8,95	116,94	
2	0,00	0,00	0,30	
	259,90	8,66	116,50	
	259,90	8,66	116,20	
3	0,00	0,00	0,33	
	259,42	8,65	120,03	
	259,42	8,65	119,70	
4	0,00	0,00	0,33	
	269,62	8,99	113,10	
	269,62	8,99	112,78	
5	0,00	0,00	0,34	
	271,50	9,05	112,43	
	271,50	9,05	112,10	
Promedio	265,78	8,86	115,54	
Desviación estándar	5,69	0,19	3,13	

ANEXO XI

GRÁFICOS DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN

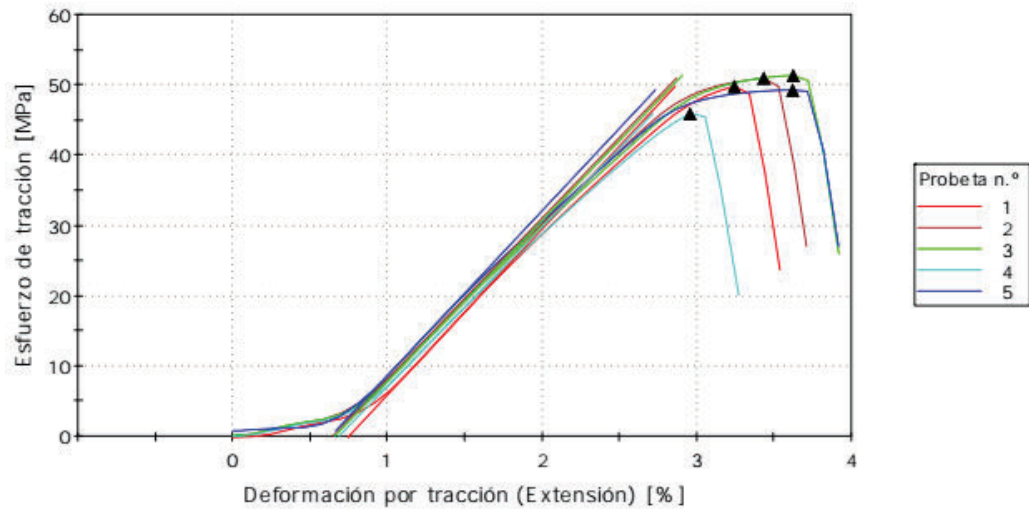


Figura AXI. 1. Curva esfuerzo versus deformación del poliestireno cristal de propósito general

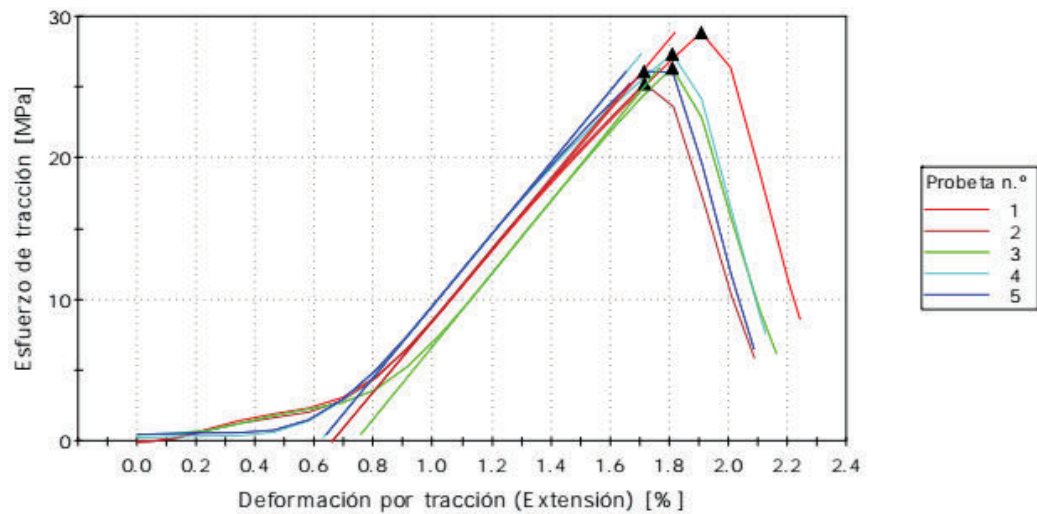


Figura AXI. 2. Curva esfuerzo versus deformación de probetas con poliestireno 95 % y polvo de tagua 5 % de malla 40

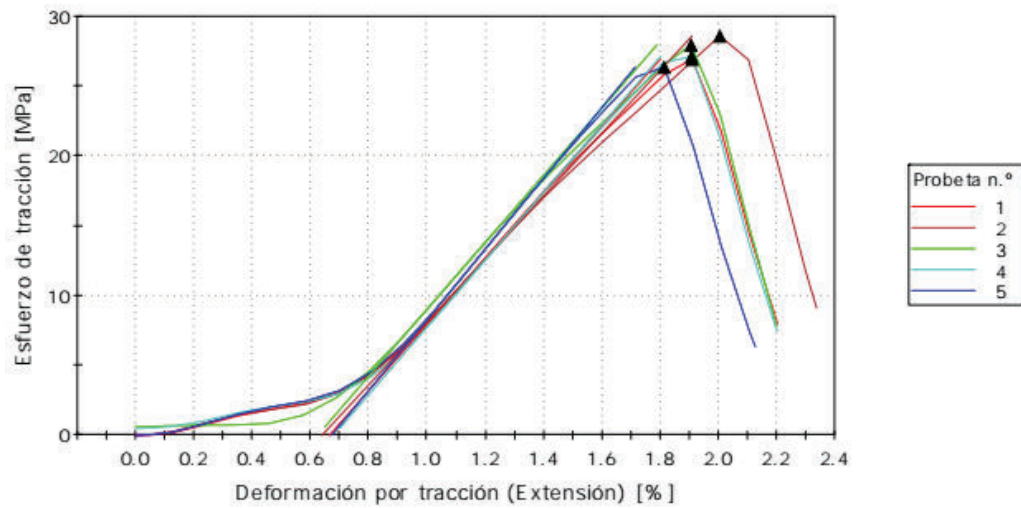


Figura AXI. 3. Curva esfuerzo versus deformación de probetas con poliestireno 90 % y polvo de tagua 10 % de malla 40

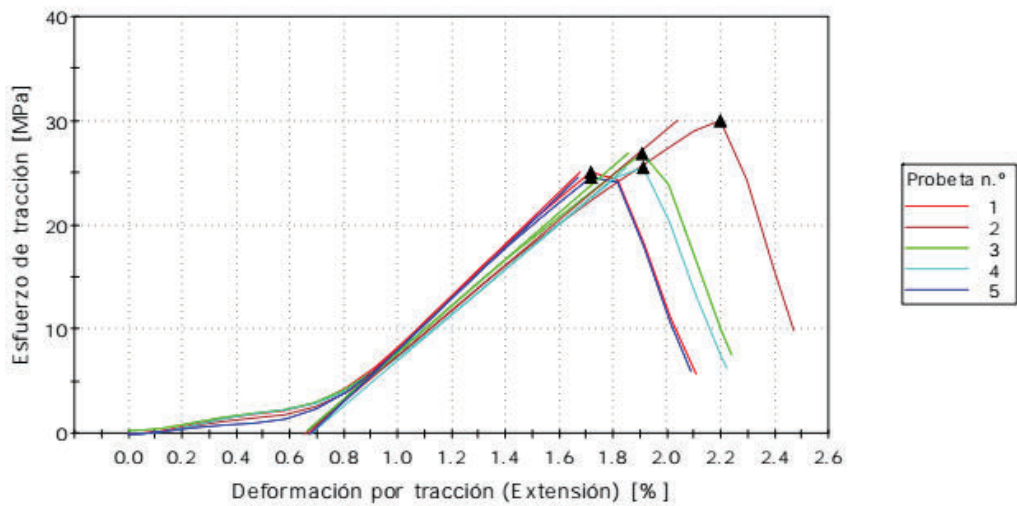


Figura AXI. 4. Curva esfuerzo versus deformación de probetas con poliestireno 85 % y polvo de tagua 15 % de malla 40

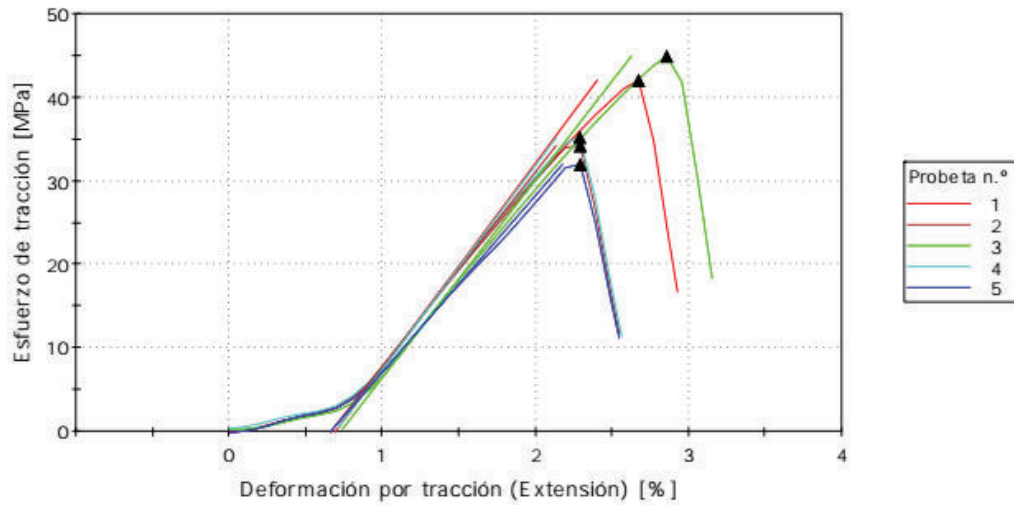


Figura AXI. 5. Curva esforço versus deformación de probetas con poliestireno 95 % y polvo de tagua 5 % de malla 60

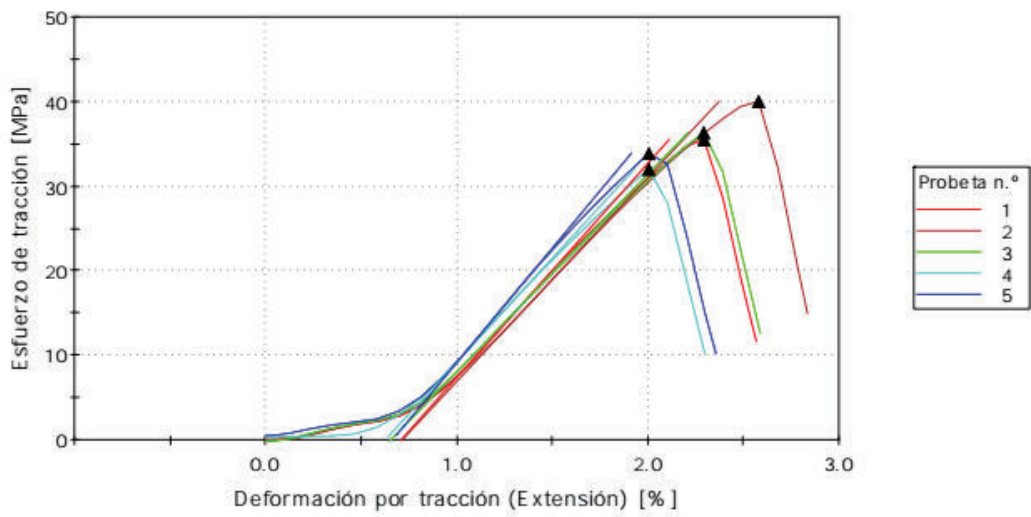


Figura AXI. 6. Curva esfuerzo versus deformación de probetas con poliestireno 90 % y polvo de tagua 10 % de malla 60

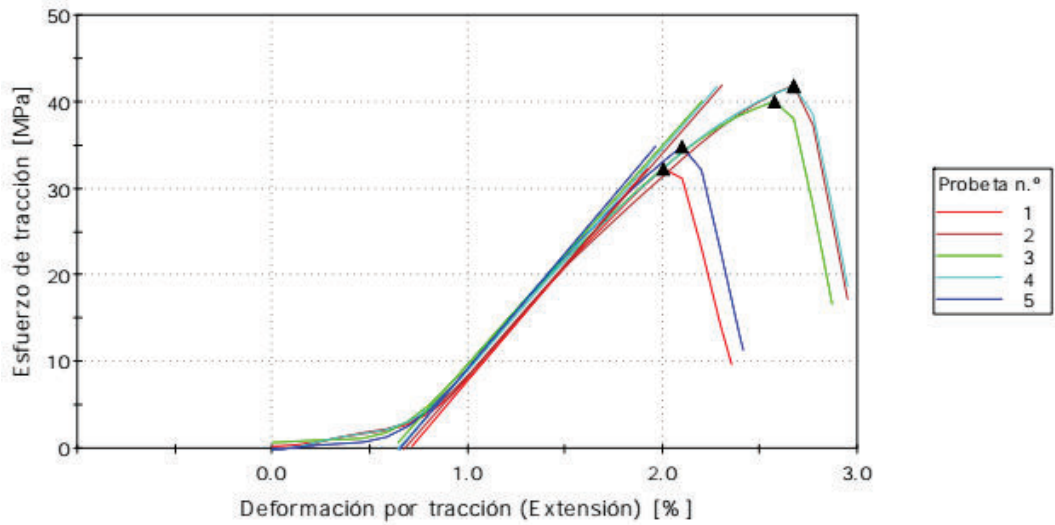


Figura AXI. 7. Curva esfuerzo versus deformación de probetas con poliestireno 85 % y polvo de tagua 15 % de malla 60

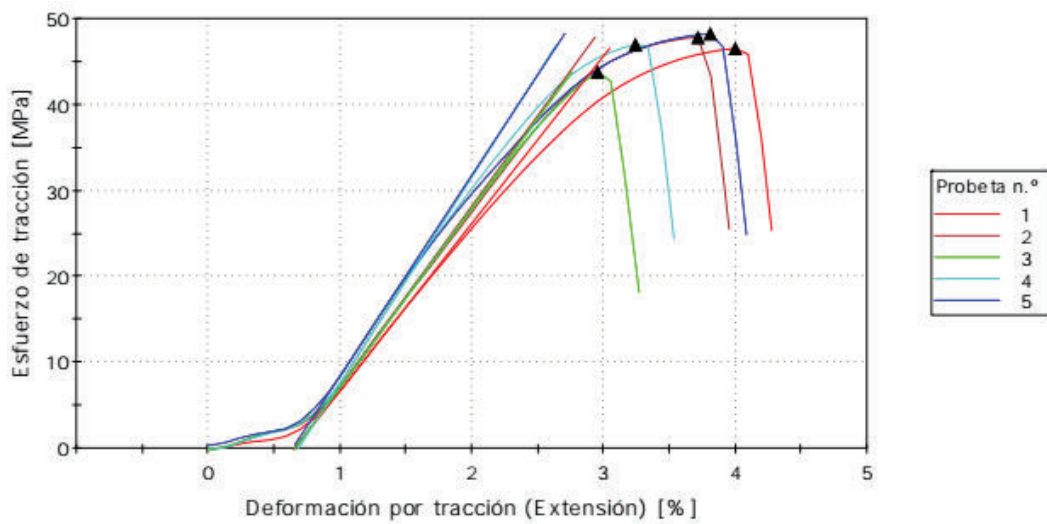


Figura AXI. 8. Curva esfuerzo versus deformación de probetas con poliestireno 95 % y polvo de tagua 5 % de malla 80

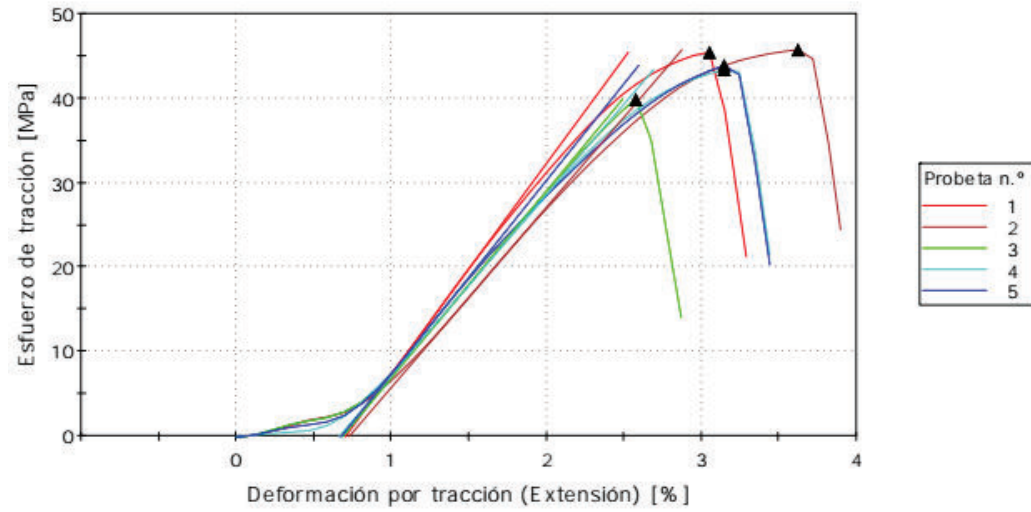


Figura AXI. 9. Curva esfuerzo versus deformación de probetas con poliestireno 90 % y polvo de tagua 10 % de malla 80

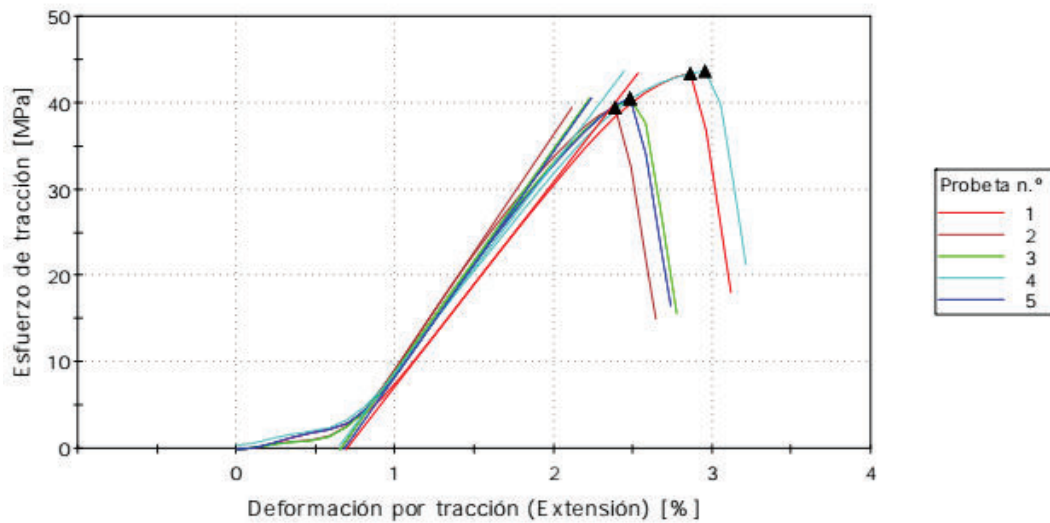


Figura AXI. 10. Curva esfuerzo versus deformación de probetas con poliestireno 85 % y polvo de tagua 15 % de malla 80