



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ DE POLIPROPILENO REFORZADO CON PARTÍCULAS DEL ENDOCARPIO DE COCO DE LA SIERRA MEDIANTE MOLDEO POR COMPRESIÓN

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

WASHINGTON DARIO LLUMIQUINGA MASAPANTA

washington.llumiquinga@epn.edu.ec

ANGEL FABRICIO PALOMO CAIZA

angel.palomo@epn.edu.ec

DIRECTOR: Ing. Carlos Wime Diaz Campoverde, M.Sc.

carlos.diaz@epn.edu.ec

Quito, Abril 2020

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **Washington Dario Llumiyinga Masapanta, Ángel Fabricio Palomo Caiza** bajo mi supervisión.

Ing. Carlos Diaz, M.Sc.

DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotros, **Washington Dario Llumiquinga Masapanta** y **Ángel Fabricio Palomo Caiza**, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra 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.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Ángel Fabricio Palomo Caiza

Washington Dario Llumiquinga Masapanta

DEDICATORIA

A mis padres quienes han estado junto a mi brindándome su apoyo incondicional durante toda mi vida, es gracias a su amor, esfuerzo y sacrificio que he llegado hasta el día de hoy.

Washington Llumiyinga

A mis padres Dioselina Caiza y Ángel Palomo, por cuidarme y brindarme todo el apoyo durante todas las etapas de mi vida, gracias a su sacrificio y amor que hoy puedo cumplir uno de mis primeros objetivos.

Fabricio Palomo

AGRADECIMIENTO

A mis padres ya que sin ellos no hubiese podido alcanzar esta meta.

A mi hermano por el apoyo y motivación.

A nuestro director, Ing. Carlos Diaz por la guía y paciencia que nos tuvo.

Al Ing. Marcelo Salvador por su buena voluntad al permitirnos usar el Laboratorio de Operaciones Unitarias como si fuese nuestro.

A Don K por toda su ayuda mientras estuvimos en el mencionado laboratorio.

Al Ing. Quiroz y demás personal del CIAP por la facilidad que nos dieron al usar sus instalaciones.

A mis amigos que de una u otra forma nos dieron una mano en la realización de este trabajo de titulación.

Washington Llumiquinga

A mis padres por ser mi apoyo incondicional en todo momento.

A mi sobrino y ahijado Mathias por darme muchas alegrías y amor.

A mis hermanos Rene, Williams, Mayra y Joel por cuidarme y estar a mi lado siempre.

A Aida por ser como una hermana.

A Edith y Mateo por llegar a una etapa de mi vida y ser un apoyo incondicional.

A Diana Luna por ser una amiga verdadera en todo momento.

A nuestro director, Ing. Carlos Diaz por la guía y paciencia que nos tuvo.

A todos quienes formaron parte de este proyecto.

Fabricio Palomo

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN	i
DECLARACIÓN	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO	v
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABLAS	x
LISTA DE ANEXOS	xi
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
INTRODUCCIÓN	1
Objetivo general	3
Objetivos específicos.....	3
1. MARCO TEÓRICO	4
1.1. Materiales compuestos	4
1.1.1. Matriz	5
1.1.2. Interfaz	7
1.1.2.1. Importancia del agente compatibilizante	7
1.1.2.2. Anhídrido maleico injerto en polipropileno.....	7
1.1.3. Refuerzo.....	8
1.2. Materiales lignocelulósicos	9
1.2.1. Celulosa	9
1.2.2. Hemicelulosa.....	9
1.2.3. Lignina	9
1.3. Coco Cumbé (<i>Parajubaea cocoide</i> Burret).....	10
1.3.1. Fruto.....	10
1.4. Métodos de procesamiento de materiales compuestos de matriz termoplástica con refuerzo natural.	10
1.4.1. Moldeo por extrusión	11
1.4.2. Moldeo por compresión	13
1.4.3. Moldeo por inyección.....	14
2. METODOLOGÍA	15
2.1. Materiales utilizados	15
2.1.1. Matriz.....	15
2.1.2. Refuerzo.....	16

2.1.3.	Compatibilizante	17
2.2.	Procedimiento experimental.....	18
2.2.1.	Estrategia experimental para obtener el material compuesto.....	20
2.2.2.	Aporte del compatibilizante	20
2.2.3.	Composición en peso y tamaño de la partícula.....	20
2.2.4.	Desarrollo del material compuesto.....	21
2.2.5	Caracterización del material compuesto	35
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	46
3.1.	Desempeño del molde	46
3.2.	Imperfección del material compuesto.....	47
3.3.	Determinación de la densidad del endocarpio de coco	49
3.4.	Caracterización de la matriz.....	49
3.4.1.	Ensayo de tracción	50
3.4.2.	Ensayo de flexión	51
3.4.3.	Ensayo de impacto	52
3.5.	Materiales Compuestos	53
3.5.1.	Determinación de la densidad.....	53
3.5.2.	Índice de fluidez.....	54
3.5.3.	Ensayo de tracción	60
3.5.4.	Ensayo de flexión	76
3.5.5.	Ensayo de impacto IZOD.....	85
3.5.6.	Caracterización térmica del material compuesto.....	94
3.6.1.	Calorimetría diferencial de barrido (DSC)	94
3.6.	Comparación con otros autores	98
4.	Conclusiones y recomendaciones.....	102
4.1.	Conclusiones	102
4.2.	Recomendaciones	103
	Referencias Bibliográficas	104
	Anexos	108

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Representación básica de un material compuesto	4
Figura 1.2. Clasificación de los materiales compuestos.	5
Figura 1.3. Representación de termoplásticos: (a) con cadenas lineales, (b) ramificadas.	6
Figura 1.4. Efecto puente del agente compatibilizante	8
Figura 1.5. a) Fruto de la palma b) Endocarpio c) Corte transversal	10
Figura 1.6. Reresentación de una extrusora	11
Figura 1.7. Giros de tornillos a) giro contrario b) giro paralelo.	12
Figura 2.1. Polipropileno H 502HC.....	15
Figura 2.2. Endocarpio de coco pulverizado	17
Figura 2.3. Polipropileno Maleizado (MAPP).....	17
Figura 2.4. Procedimiento para obtener el material compuesto.....	19
Figura 2.5. Nomenclatura utilizada en las composiciones del material compuesto.....	20
Figura 2.6. Pasos para la obtención del endocarpio de coco (EN). a) recolección, b) pelado,	21
Figura 2.7. Estufa MEMMERT UNB 500 con control de temperatura.	22
Figura 2.8. Molino de martillos.	23
Figura 2.9. Tamiz para el molino de matillos.	23
Figura 2.10. Agitador mecánico.	24
Figura 2.11. Juego de tamices.	24
Figura 2.12. Diagramas de las etapas de extrusión.....	25
Figura 2.13. Extrusora XINDA PSHJ-35.....	26
Figura 2.14. Perfil de temperaturas.	28
Figura 2.15. Ejemplo de cálculo para el dosificador secundario con EN de 600 μm y 15 wt%.	28
Figura 2.16. Material compuesto pelletizado.	29
Figura 2.17. Molde hembra-macho.	30
Figura 2.18. Pellets del material compuesto.....	30
Figura 2.19. Diagrama de flujo para obtener la densidad del endocarpio de coco.....	32
Figura 2.20. Prensa hidráulica.	33
Figura 2.21. Ventilador de pedestal.....	34
Figura 2.22. Diagrama de flujo para el proceso de moldeo.	35
Figura 2.23. a) Tablero obtenido del moldeo por compresión, b) Probeta para flexión obtenida por corte a laser.	36
Figura 2.24. Dimensiones y geometría para probeta de tracción Tipo IV, por la norma ASTM D638-14.	37
Figura 2.25. Maquina universal de ensayos.	38
Figura 2.26. a) Montaje de probeta, b) Probeta para tracción, c) Probeta ensayada a tracción.....	38
Figura 2.27. Probeta con dimensiones y geometrías para flexión.	40
Figura 2.28. a) Montaje de la probeta a flexión, b) y c) probeta antes de realizar el ensayo a flexión, d) probeta después de realizar el ensayo a flexión.	40
Figura 2.29. Geometría y dimensiones para probetas a impacto.	41
Figura 2.30. Máquina para ensayos de impacto Tinius Olsen IT 504.	42
Figura 2.31. DSC Q2000 TA Instruments.....	43
Figura 2.32. Medidor de fluidez INSTRON CEAST MF30.	44
Figura 3.1. Tableros con fallas más relevante para el PP al 100%, a) Falta de fusión, b) Tiempo insuficiente para la fusión, d) burbujas internas, c) Tablero sin imperfecciones.....	47

Figura 3.2. Tableros del material compuesto, a) Falta de material y presión, b) Falta de material,	48
Figura 3.3. Esquema de procesos termoquímicos para transformación de la lignina y sus productos potenciales.	49
Figura 3.4. Curva resistencia a la tracción vs. deformación unitaria de 100%PP.	51
Figura 3.5. Condiciones finales de la probeta de 100%PP sometida a tracción.	51
Figura 3.6. Curva resistencia a la flexión vs. deformación unitaria de 100%PP.....	52
Figura 3.7. Probeta de flexión según la norma ASTM D790.....	52
Figura 3.8. Condiciones finales de la probeta de 100%PP sometida al ensayo de impacto.	53
Figura 3.9. Efecto del tamaño de refuerzo en el índice de fluidez para 5% del mismo.	56
Figura 3.10. Efecto del tamaño de refuerzo en el índice de fluidez para 10% del mismo. ...	56
Figura 3.11. Efecto del tamaño de refuerzo en el índice de fluidez para 15% del mismo. ...	57
Figura 3.12. Efecto del porcentaje de refuerzo en el índice de fluidez para 150µm.....	58
Figura 3.13. Efecto del porcentaje de refuerzo en el índice de fluidez para 250µm.....	59
Figura 3.14. Efecto del porcentaje de refuerzo en el índice de fluidez para 600µm.....	59
Figura 3.15. Curvas de la resistencia a la tracción vs. deformación unitaria de los materiales compuestos.	62
Figura 3.16. Condiciones finales de las probetas de los materiales compuestos sometidos a tracción.	63
Figura 3.17. Efecto del tamaño de refuerzo en la resistencia a la tracción para 5% del mismo.	64
Figura 3.18. Efecto del tamaño de refuerzo en la elongación en el punto de ruptura para 5%.	64
Figura 3.19. Efecto del tamaño de refuerzo en la resistencia a la tracción para 10% del mismo.	65
Figura 3.20. Efecto del tamaño de refuerzo en la elongación en el punto de ruptura para 10%.	65
Figura 3.21. Efecto del tamaño de refuerzo en la resistencia a la tracción para 15% del mismo.	66
Figura 3.22. Efecto del tamaño refuerzo en la elongación en el punto de ruptura para 15%.	67
Figura 3.23. Efecto del porcentaje de refuerzo en la resistencia a la tracción para 150µm. .	68
Figura 3.24. Efecto del porcentaje de refuerzo en la elongación en el punto de ruptura para un tamaño de 150µm.	69
Figura 3.25. Efecto del porcentaje de refuerzo en la resistencia a la tracción para 250µm. .	70
Figura 3.26. Efecto del porcentaje de refuerzo en la elongación en el punto de ruptura para un tamaño de 250µm.	70
Figura 3.27. Efecto del porcentaje de refuerzo en la resistencia a la tracción para 600µm. .	71
Figura 3.28. Efecto del porcentaje de refuerzo en la elongación en el punto de ruptura para un tamaño de 600µm.	72
Figura 3.29. Curva de la resistencia a la tracción vs. deformación del polipropileno con el .	73
Figura 3.30. Falla recurrente en el ensayo de tracción.....	74
Figura 3.31. Sección transversal de cada composición de material compuesto ensayado a tracción.	74
Figura 3.32. Sección transversal probeta sometida a tracción	75
Figura 3.33. Sección transversal de probetas sometidas a tracción, a) Material compuesto 15%-600µmn, b) 100%PP.....	75
Figura 3.34. Curvas de la resistencia a la flexión vs. deformación unitaria de los diferentes materiales compuestos.	77
Figura 3.35. Condiciones finales de la probeta de los materiales compuestos sometidos a flexión.	77

Figura 3.36. Efecto del tamaño de refuerzo en la resistencia a la flexión para 5% del mismo.	78
Figura 3.37. Efecto del tamaño de refuerzo en la resistencia a la flexión para 10% del mismo.	79
Figura 3.38. Efecto del tamaño de refuerzo en la resistencia a la flexión para 15% del mismo.	80
Figura 3.39. Efecto del porcentaje de refuerzo en la resistencia a la flexión para 150 μ m....	81
Figura 3.40. Efecto del porcentaje de refuerzo en la resistencia a la flexión para 250 μ m....	82
Figura 3.41. Efecto del porcentaje de refuerzo en la resistencia a la flexión para 6000 μ m.	82
Figura 3.42. Curva de la resistencia a la tracción vs. deformación del polipropileno con el material compuesto con las mejores características.	84
Figura 3.43. Sección transversal de cada composición del material compuesto ensayado a flexión.	84
Figura 3.44. Sección transversal de probetas sometidas a flexión.	85
Figura 3.45. Sección frontal de las probetas sometidas a flexión, a) composición 10%-250 μ m y b) 100%PP.	85
Figura 3.46. Condiciones finales de las probetas de los materiales compuestos sometidos al ensayo de impacto.	86
Figura 3.47. Efecto del tamaño de refuerzo en la energía de impacto para 5% del mismo..	87
Figura 3.48. Efecto del tamaño de refuerzo en la energía de impacto para 10% del mismo.	88
Figura 3.49. Efecto del tamaño de refuerzo en la energía de impacto para 5% del mismo..	88
Figura 3.50. Efecto del porcentaje de refuerzo en energía de impacto para 150 μ m.....	90
Figura 3.51. Efecto del porcentaje de refuerzo en la energía de impacto para 250 μ m.	90
Figura 3.52. Efecto del porcentaje de refuerzo en la resistencia a la flexión para 150 μ m....	91
Figura 3.53. Probetas bajo la norma ASTM D256-10, a) Antes del ensayo, b) Después del ensayo.	92
Figura 3.54. Probetas de 100%PP sometidas al ensayo de impacto, a) antes del ensayo, b) después del ensayo.	93
Figura 3.55. Fractura de todas las probetas sometidas a impacto.....	93
Figura 3.56. Material compuesto 15%-600 μ m, con mayor resistencia al impacto.....	94
Figura 3.57. Termograma DSC de las muestras ensayadas.	94
Figura 3.58. Termograma DSC de la sección de fusión de las muestras ensayadas.	95
Figura 3.59. Termograma ampliado para la zona Tg del 100%PP.	96
Figura 3.60. Termograma ampliado para la zona Tg del material compuesto 15%-600 μ m .	96
Figura 3.61. Termograma ampliado para la zona Tc del 100%PP.....	97
Figura 3.62. Termograma ampliado para la zona Tc del material compuesto 15%-600 μ m.	98
Figura 3.63. Comparación de la resistencia a tracción con otras investigaciones	99
Figura 3.64. Porcentaje de elongación en el ensayo a tracción de otros autores.	100
Figura 3.65. Módulo de elasticidad de otros autores.	101

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Propiedades del polímero (H 502HC).....	16
Tabla 2.2. Composición del endocarpio de coco.....	17
Tabla 2.3. Propiedades del compatibilizante.....	18
Tabla 2.4 Composición y nomenclatura de los materiales compuestos.....	21
Tabla 2.5. Especificaciones de la extrusora XINDA.....	27
Tabla 2.6. Especificaciones de la bomba de vacío marca Rocker.....	31
Tabla 2.7. Especificaciones del ventilador.....	34
Tabla 2.8. Composiciones utilizadas para el ensayo térmico.....	42
Tabla 2.9. Parámetros para el ensayo DSC.....	43
Tabla 2.10. Condiciones para determinar el índice de fluidez.....	45
Tabla 3.1. Porcentaje de masa desperdiciada durante el moldeo.....	47
Tabla 3.2. Densidad del endocarpio de coco, para un tamaño de 250µm.....	49
Tabla 3.3. Propiedades mecánicas del polipropileno obtenidas mediante el ensayo de tracción.....	50
Tabla 3.4. Propiedades mecánicas del polipropileno obtenidas mediante el ensayo de flexión.....	52
Tabla 3.5. Resultado de ensayos de impacto de la matriz.....	53
Tabla 3.6. Densidad teórica y aparente de los materiales compuestos.....	54
Tabla 3.7. índice de fluidez de los materiales compuestos.....	55
Tabla 3.8. ANOVA del tamaño de partícula sobre el MFI.....	57
Tabla 3.9. ANOVA del porcentaje de refuerzo sobre el MFI.....	60
Tabla 3.10. Propiedades de los materiales compuestos obtenidas después de someter las probetas al ensayo de tracción.....	61
Tabla 3.11. ANOVA del tamaño de partícula sobre la resistencia a tracción.....	67
Tabla 3.12. ANOVA del porcentaje en peso de refuerzo sobre la resistencia a tracción.....	72
Tabla 3.13. Resumen de propiedades de 100%PP y el material compuesto con las mejores características.....	73
Tabla 3.14. Propiedades de los materiales compuestos obtenidas después de someter las probetas al ensayo de flexión.....	76
Tabla 3.15. ANOVA del tamaño de partícula sobre la resistencia a flexión.....	80
Tabla 3.16. ANOVA del porcentaje en peso de refuerzo sobre la resistencia a flexión.....	83
Tabla 3.17 Resumen de propiedades de 100%PP y el material compuesto con las mejores características a flexión.....	83
Tabla 3.18. Propiedades de los materiales compuestos obtenidas después de someter las probetas al ensayo de impacto.....	86
Tabla 3.19. ANOVA del tamaño de partícula sobre la energía de impacto.....	89
Tabla 3.20. ANOVA del tamaño de partícula sobre la energía de impacto.....	91
Tabla 3.21. Resumen de propiedades de 100%PP y el material compuesto con las mejores características en el ensayo de impacto.....	92
Tabla 3.22. Propiedades térmicas obtenidas del ensayo DSC.....	95
Tabla 3.23. Temperatura de transición vítrea.....	96
Tabla 3.24. Temperatura de cristalización.....	98
Tabla 3.25 Resumen de las diferentes matrices y porcentaje de refuerzos realizados en investigaciones similares.....	99

LISTA DE ANEXOS

Anexo I. Polipropileno H 502HC.....	108
Anexo II. Tabla de especificaciones del MAPP	109
Anexo III. Planos del molde.....	110
Anexo IV. Densidad teórica de material comuesto	111
Anexo V. Resultados del ensayo del índice de fluidez.	114
Anexo VI. Resultados ensayo de tracción.	118
Anexo VII. Resultados ensayo de flexión.	124
Anexo VIII. Resultados ensayo de impacto.	134
Anexo IX. Ejemplo de cálculo DSC	140

RESUMEN

En el presente trabajo se caracterizó un material compuesto de matriz polimérica con refuerzo orgánico. Mediante un estudio de la variación en las propiedades mecánicas del polipropileno H502 de la marca Braskem causadas por el uso de partículas del endocarpio del fruto de la palma *Parajubaea cocoide* Burret o también conocido como coco de la sierra. Las variables establecidas fueron el porcentaje en peso de las partículas y el tamaño de las mismas. El porcentaje en peso fue de 5, 10 y 15% y el tamaño de 150, 250 y 600 μ m. Como agente compatibilizante se usó 3% en peso de anhídrido maleico injerto en polipropileno (MAPP).

Los materiales compuestos fueron obtenidos mediante extrusión para homogenizar la mezcla polipropileno-refuerzo, después mediante moldeo por compresión se obtuvo tableros de las diferentes composiciones y finalmente se cortó los tableros para obtener las diferentes probetas. Se realizaron ensayos de densidad, índice de fluidez, tracción, flexión, impacto y calorimetría diferencial de barrido (DSC).

En base a los resultados obtenidos se observó que los materiales compuestos sufrieron una disminución en sus diferentes propiedades mecánicas debido a las porosidades presentes. Las imperfecciones ocurrieron en la etapa de desgasificación durante el proceso de extrusión.

Después del análisis de datos, se concluyó que el material compuesto 15%-600 μ m obtuvo las menores disminuciones de propiedades durante el ensayo de tracción, la cual presentó una disminución del 42% en su resistencia y una reducción de 2,7% en su deformación. Después del ensayo de flexión se concluyó que la menor reducción de estas propiedades fue en el material compuesto 10%-250 μ m el cual presentó una disminución de apenas el 6% en su resistencia en dicho ensayo.

Palabras clave: Polipropileno, endocarpio, propiedades, ensayos.

ABSTRACT

In this research, was characterized a polymer matrix composite with organic reinforcement. Through a study of variation in the mechanical properties of the H502 polypropylene from the Braskem brand caused by the use of particles from the endocarp of the palm fruit *Parajubaea cocoide* Burret or also known as coconut from sierra region. The variables established were the percentage by weight of the particles and their own size. The weight percentage was 5, 10 and 15% and the size was 150, 250 and 600 μ m. As the compatibilizing agent, 3% by weight of polypropylene grafted maleic anhydride (MAPP) was used.

The composite materials were obtained by extrusion to homogenize the polypropylene-reinforcement mixture, then by compression molding the tables of the different compositions were obtained and finally the tables were cut to obtain the different test pieces. Density, fluidity index, tensile, flexure, impact and differential scanning calorimetry (DSC) tests were performed.

Based on the results obtained, it was observed that the composite materials suffered a decrease in their different mechanical properties due to the porosities present. The imperfections occurred in the degassing stage in the extrusion process.

After data analysis, it is concluded that 15%-600 μ m composite material got the smallest decreases in properties during the tensile test, which showed a 42% decrease in its resistance and a 2,7% reduction in its deformation. After the flexion test, it was concluded that 10%-250 μ m composite material had a decrease of just 6% in its resistance in this test.

Keywords: Polypropylene, endocarp, properties, tests.

CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ DE POLIPROPILENO REFORZADO CON PARTÍCULAS DEL ENDOCARPIO DE COCO DE LA SIERRA MEDIANTE MOLDEO POR COMPRESIÓN

INTRODUCCIÓN

El sector del plástico es uno de los más dinámicos de la economía del Ecuador, siendo así los termoplásticos una de las principales cadenas de producción dentro de la industria. Las empresas que hacen el sector plástico ecuatoriano se relacionan con los procesos de extrusión, soplado, termoformado, inyección y rotomoldeo; y los termoplásticos más usados son: PET, HDPE, PVC, LDPE, PP Y PS [1]. En el Ecuador, la utilización de refuerzos naturales se ha limitado en su mayor parte a la extracción y uso artesanal. Sin embargo, existen diversos proyectos de investigación en el campo de los materiales, los cuales se centran en el desarrollo y estudio de aplicaciones de materiales compuestos reforzados con materiales naturales. Entre las plantas más utilizadas para la extracción de fibra están 25 especies. Se trata de fibras extraídas de plantas como la cabuya, abacá, coco, totora, palmas, paja toquilla, algodón, lufa, seda, bambú, bejucos, pitigua, balsa, matapalo, caucho, rampira, anona, batea, achiote, majagua, higuierón, ortiga, mimbre y bejuco real [2].

En la actualidad, el desarrollo de nuevos materiales que mejoren las características mecánicas de los materiales utilizados comúnmente y que además sean amigables con el medio ambiente ha conllevado a la necesidad de utilizar materiales proporcionados por la naturaleza, muchos de los cuales no han sido utilizados en la industria. Es por esto, que se busca aprovechar al endocarpio del coco de la sierra debido a su gran dureza y resistencia ya que en la actualidad este tipo de fruto tiene aplicación alguna. Además, la falta de investigaciones referentes al tema y a las aplicaciones del endocarpio del coco de la sierra son también un motivante para el desarrollo de este estudio.

En este trabajo, se desarrolló un material compuesto con una matriz de Polipropileno (PP), reforzado con partículas de endocarpio de coco (EN) de la sierra. El mismo fue caracterizados mediante ensayos mecánicos, físicos y térmicos, comprobando de esta manera el desempeño del material. Previo al estudio del material compuesto se desarrollaron probetas normalizadas para los diferentes ensayos.

El análisis del material compuesto considera variables del tamaño y porcentaje en peso del refuerzo al unirlos con una matriz de polipropileno (PP) y el efecto que estas tendrán sobre las propiedades mecánicas, térmicas y físicas del material compuesto.

En el primero capítulo de este manuscrito, se realiza una revisión general acerca del coco de la sierra llamado científicamente *Parajubaea Coccoide Burret* [3]. También se hace una revisión bibliográfica acerca de los diferentes procesos para la obtención de materiales compuestos que tienen una matriz termoplástica y la importancia de los materiales compuestos en el Ecuador. En el segundo capítulo se detallan todos los procesos, etapas, parámetros, equipos y materiales usados, para obtener el material compuesto de la presente investigación. Como parte final de este capítulo se tiene la descripción de los ensayos mecánicos, térmicos y físicos realizados, así mismo como de las normas utilizadas. En el tercer capítulo se exponen los resultados y un análisis de estos. El cuarto capítulo presenta las conclusiones y recomendaciones de acuerdo con los resultados obtenidos en el anterior capítulo, para de esta forma concordar con los objetivos planteados al inicio del proyecto.

El presente trabajo fue desarrollado con la colaboración de los laboratorios: Laboratorio de Operaciones Unitarias (Ingeniería Química), Laboratorio de Nuevos Materiales (LANUM) (Ingeniería Mecánica) y al Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros (CIAP), pertenecientes a la Escuela Politécnica Nacional (EPN).

Objetivo general

Caracterizar un material compuesto de matriz polipropileno reforzado con partículas del endocarpio del coco de la sierra mediante moldeo por compresión.

Objetivos específicos

- Establecer una relación másica adecuada entre el material de refuerzo y la matriz.
- Realizar los ensayos mecánicos correspondientes a las diferentes probetas obtenidas con las variaciones de tamaño y relación matriz-refuerzo.
- Identificar el material compuesto con las mejores características mecánicas.

1. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se describen de manera general los conceptos elementales concernientes a materiales compuestos, así como la terminología utilizada dentro de los materiales compuestos de matriz polimérica. Con base a la revisión bibliográfica se aborda la importancia y la influencia de un agente compatibilizante para el desarrollo del material compuesto. Finalmente se describen los métodos más comunes en el procesamiento de materiales compuestos en la industria.

1.1. Materiales compuestos

A un material compuesto se lo puede definir como un sistema de materiales formado por dos o más fases con una interfaz claramente definida que los separa, la cual se caracteriza por la existencia de una discontinuidad abrupta de las propiedades, que tienen diferente forma, composición química y principalmente son insolubles entre sí [4]. Además, en ciertos casos existe un componente adicional el cual generalmente es un agente compatibilizante, rellenos o revestimientos. En estos materiales las propiedades finales difieren de las propiedades de sus fases constituyentes por separado [5].

Los materiales compuestos están formados principalmente por 3 elementos:

- Matriz
- Refuerzo
- Interfaz

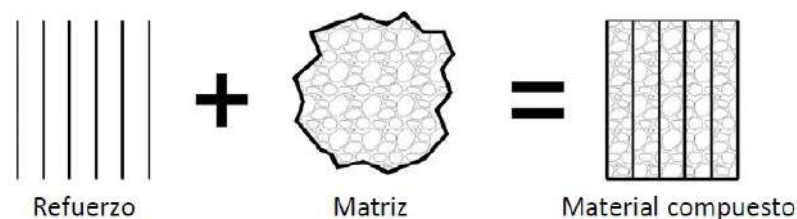


Figura 1.1. Representación básica de un material compuesto
(Fuente: [6])

El concepto de unir materiales para la obtención de otro material no es nuevo y un claro ejemplo de eso es el adobe el cual es un material compuesto, en el que la matriz es arcillosa y el refuerzo es paja o fibras vegetales, ha sido empleado desde el Antiguo Egipto hasta la actualidad por las comunidades rurales de países interandinos. Otro ejemplo de esto es el acero perlítico el cual está constituido por dos fases bien distinguidas entre sí, ferrita y

cementita. La primera es una fase blanda y dúctil mientras que la segunda es dura y frágil, las cuales al ser combinadas dan características a dicho acero superiores que las de sus fases constituyentes. De hecho, es un concepto basado en la naturaleza ya que se tiene ejemplos como la madera, en la cual la lignina y hemicelulosa hacen las veces de matriz mientras que las microfibrillas de celulosa son el material de refuerzo [7].

Los materiales compuestos según Callister, 2014, se clasifican:

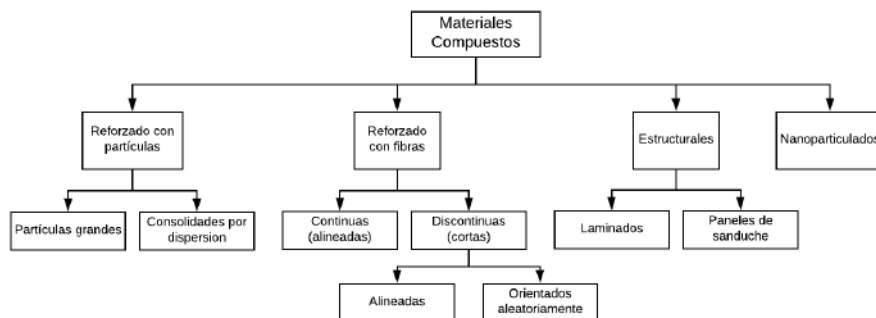


Figura 1.2. Clasificación de los materiales compuestos.
(Fuente: [7])

1.1.1. Matriz

Es parte importante de un material compuesto, ya que es donde se ubica el refuerzo, el cual puede ser particulado, fibras o estructurado. Brinda estabilidad y continuidad al material de ahí que se la conozca como fase continua. El material empleado como matriz tiene influencia en las propiedades físicas, químicas, eléctricas y mecánicas del material compuesto final [2].

Las principales funciones de la matriz son:

- Proteger al refuerzo del ambiente externo.
- Proteger al refuerzo de la abrasión mecánica.
- Transferir las cargas hacia el refuerzo.
- Mantener unido el refuerzo.
- Prevenir la propagación de grietas

Las principales matrices usadas actualmente se dividen en 3 grandes grupos:

- a) Matriz polimérica
- b) Matriz cerámica
- c) Matriz metálica

1.1.1.1. Matriz polimérica

Los polímeros son sustancias de origen natural como la celulosa o sintético como es el caso del polipropileno. Son cadenas compuestas por la repetición de un mero, también conocida como unidad base [8]. Es el tipo de matriz más empleado debido principalmente a su bajo costo, fácil procesabilidad, buenas propiedades mecánicas a temperatura ambiente y su baja densidad.

A su vez se divide en:

- a) Matriz termoplástica
- b) Matriz termoestable
- c) Matriz elastomérica

1.1.1.2. Matriz Termoplástica

A diferencia de los materiales termoestables estos al calentarse no se degradan en lugar de estos se funden, es decir, pasan a un estado líquido lo cual favorece su reciclaje. Este proceso ocurre porque al aumentar la temperatura la fuerza de los enlaces de Van Der Waals se reducen [9]. Poseen módulos de elasticidad que se encuentran en el rango de 0,2– 5GPa [10]. Las matrices termoplásticas más comunes de este tipo de materiales son el polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS), policloruro de vinilo (PVC) y el politetrafluoroetileno (PTFE) conocido también como teflón. Son considerados polímeros lineales como se observa en la Figura 1.3 a), durante la síntesis del polímero pueden ocurrir reacciones secundarias que generan cadenas ramificadas, como se observa en la Figura 1.3 b), se las conoce como cadenas ramificadas.

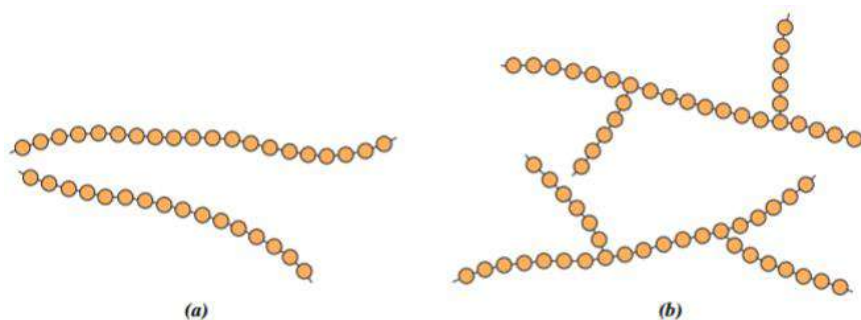


Figura 1.3. Representación de termoplásticos: (a) con cadenas lineales, (b) ramificadas.
(Fuente: [7])

En el presente trabajo se emplea polipropileno como matriz de un material compuesto. Es un polímero semicristalino que presenta tanto fase cristalina como una fase amorfa en su estructura molecular. Es un material de alto uso ingenieril debido a sus buenas propiedades mecánicas a temperatura ambiente, baja densidad, bajo costo, entre otras. Sus usos más comunes son tanques de líquidos, recubrimiento de cables, piezas de automóvil, entre otros.

Por su alta resistencia a la fatiga, resistencia química y facilidad de maquinado, el polipropileno ha sido utilizado como matriz en el desarrollo de materiales compuestos donde el refuerzo generalmente es un material de origen natural. Debido a la naturaleza no polar del polipropileno y a la naturaleza polar del refuerzo al unirlos existe una fase inmiscible entre estos, lo cual afecta negativamente las propiedades mecánicas y térmicas [11].

1.1.2. Interfaz

La interfaz es la superficie de contacto entre la matriz y el refuerzo. Es de gran importancia ya que de esta depende la unión entre cada una de las fases. Una correcta unión garantizará buenas propiedades mecánicas o en su defecto una mala unión bajas propiedades mecánicas. Cuando la naturaleza de las fases es diferente entre sí, se emplea un agente compatibilizante. Los agentes compatibilizantes son aquellos aditivos que se adicionan al material compuesto durante su etapa de procesamiento con el fin de mejorar la dispersión del refuerzo en la matriz, es decir, mejoran las propiedades interfaciales permitiendo la formación de compuestos monofásicos lo que a su vez conlleva a la obtención de mejores propiedades mecánicas [12].

1.1.2.1. Importancia del agente compatibilizante

Cuando se unen elementos de diferente naturaleza las propiedades interfaciales serán pobres debido a la falta de compatibilidad existente entre componentes lo que significará propiedades mecánicas bajas. De manera que se necesita que una molécula extra haga las veces de puente entre las dos superficies [13]. Los compatibilizantes de mayor uso son: anhídrido maléico, anhídrido maléico injerto en polietileno o polipropileno, silanos e isocianatos [14].

1.1.2.2. Anhídrido maleico injerto en polipropileno

El polipropileno es de naturaleza hidrofóbica (no polar) mientras que los materiales orgánicos son principalmente hidrofílicos (polares) [15], estos últimos poseen grupos funcionales -OH en la superficie, lo cual significa que al momento de unirlos dicha unión no será adecuada. La mejor forma de corregir este problema es modificar la matriz mediante la adición de un agente compatibilizante, en este caso anhídrido maleico injerto en polipropileno (MAPP) [16]. En la Figura 1.4. se observa como el MAPP se une a la cadena principal de polipropileno lo cual permite que la matriz y el refuerzo reaccionen correctamente entre sí.

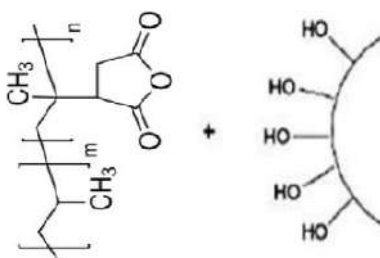


Figura 1.4. Efecto puente del agente compatibilizante
(Fuente: Propia)

1.1.3. Refuerzo

El refuerzo en un material compuesto se lo conoce también como fase dispersa. Los refuerzos de uso más común son refuerzos del tipo particulado, en fibras y estructurales [17]. Sus principales funciones son:

- Soportar cargas transmitidas por la matriz
- Brindar a la matriz propiedades multifuncionales (aumento de la resistencia y rigidez mecánica, etc.)

1.1.3.1. Partículas grandes

Son aquellas en las que las interacciones entre la matriz y el refuerzo no se tratan a nivel atómico ni molecular. Su diámetro oscila entre 5 a 500 μm [18]. Este tipo de refuerzo tiende a restringir el movimiento de la matriz alrededor de cada partícula, posee una geometría diversa la cual es aproximadamente de la misma dimensión en todas las direcciones (similar a una esfera) lo cual la vuelve equiaxial [7]. En el presente estudio se empleó este tipo de partículas, basándose en estudios de Suapan y Harimi (2003) [19], J. Páez (2007) [20] y Sarki et al. (2011) [21] se escogieron tamaños de 150, 250 y 600 μm con porcentajes del 5% 10% y 15% para cada uno de los tamaños mencionados.

1.1.3.2. Partículas consolidadas por dispersión

La principal diferencia entre este tipo de refuerzo particulado y el anterior es su tamaño, el cual está entre 10 – 100 nm, por lo tanto, sus interacciones se tratan a un nivel atómico y molecular. Dos de las razones de su gran uso en la actualidad se debe a la significativa mejora

de las propiedades con un bajo porcentaje en peso (menor al 5%), y al aumento del área superficial de contacto a medida que el tamaño de la partícula disminuye [16].

1.2. Materiales lignocelulósicos

Las paredes celulares de las plantas consisten en polisacáridos, compuestos fenólicos y compuestos minoritarios (minerales, lípidos, proteínas, etc.) [22]. Los polisacáridos a su vez se clasifican en celulosa, hemicelulosas y lignina, los cuales son los componentes principales de dichas paredes. Están constituidos en una relación 4:3:3 de celulosa, hemicelulosa y lignina respectivamente (la relación varía dependiendo de las diferentes especies vegetales) [2].

Durante la última década ha crecido mucho el interés de estos materiales como fuente de energía (biocombustibles) y como materia prima para la fabricación de materiales compuestos por su bajo precio y fácil procesabilidad [23]. Algunos ejemplos son la madera, yute, cáñamo, residuos agrícolas, entre otros [24].

1.2.1. Celulosa

Es el más abundante biopolímero del planeta. Es un homopolisacárido, es decir, es una cadena del mismo monosacárido que se repite aproximadamente 10.000 veces formando microfibrillas las cuales se encuentran empaquetadas muy densamente [22]. La superficie de las microfibrillas es altamente polar, debido a los grupos hidroxílicos que se encuentran presentes por los puentes de hidrógeno. Contiene zonas amorfas y cristalinas [25].

1.2.2. Hemicelulosa

Su función principal es proporcionar rigidez a la pared celular por su interacción con la celulosa y la lignina. Es un heteropolisacárido ya que se encuentra formado por más de un monosacárido (que se repite entre 20 a 300 veces), formando una cadena ramificada [22].

1.2.3. Lignina

Es un grupo de compuestos químicos que se encuentran en las paredes celulares de las plantas. Viene del término latín *lignum* que significa madera, de manera que a las plantas con gran cantidad de lignina se las conoce como plantas leñosas [26]. Es el segundo biopolímero más abundante del planeta. No se ha definido su estructura exacta, pero se la puede

considerar como una red tridimensional biopolimérica formada por unidades de fenilpropano. Es de naturaleza hidrofóbica lo que ayuda a su permeabilidad de los poros entre células vegetales [22]. Su principal función es brindar un soporte estructural a las plantas.

1.3. Coco Cumbé (*Parajubaea cocoide* Burret)

Es una palma de coco que pertenece a las palmas solitarias monoicas. Prácticamente su único uso es el ornamental, se encuentra en calle y avenidas de algunas ciudades del Ecuador y del sur de Colombia sobre los 2500–3000 m.s.n.m. [3]. Sus principales características son: tallo alto color grisáceo, con una inflorescencia pedunculada [27].

1.3.1. Fruto

Sus frutos son comestibles, entre 4 a 5 cm de largo de forma ovoide, lisos, con un endocarpio rígido de color café con un espesor que va de 6 a 7 mm de espesor. En la Figura 1.5 se muestra la forma del fruto.

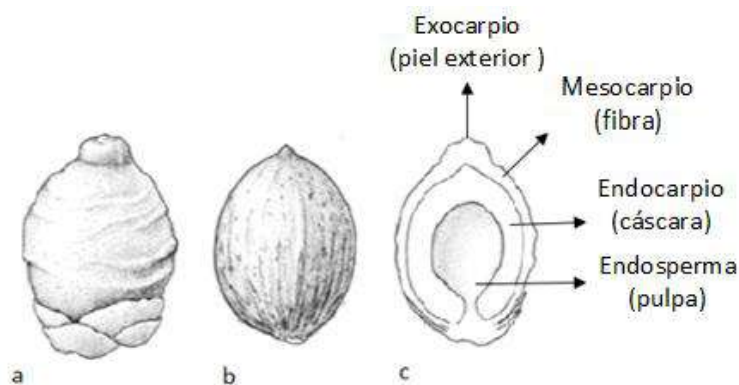


Figura 1.5. a) Fruto de la palma b) Endocarpio c) Corte transversal
(Fuente: [3])

Su fruto está compuesto de exocarpio, mesocarpio, endocarpio y endosperma. El endocarpio es la capa dura por su contenido de lignina, así como también de celulosa y hemicelulosa, en proporciones tales que se las puede considerar madera dura [28].

1.4 Métodos de procesamiento de materiales compuestos de matriz termoplástica con refuerzo natural.

Actualmente existe varios métodos en el desarrollo de materiales compuestos de matriz termoplástica por su relativa facilidad de procesamiento. La selección del proceso de fabricación es de vital importancia ya que representa un 50 a 60% del costo final del producto

[29], donde uno de los objetivos principales en las empresas es la reducción de costos. Así también su selección dependerá del tipo de matriz, tipo y geometría del refuerzo a emplear y aplicaciones del material compuesto final.

Los métodos más comunes para el procesamiento de materiales compuestos son la extrusión y la inyección. En la extrusión generalmente se obtienen perfiles lineales continuos homogéneos, los cuales son obtenidos cuando la matriz junto con el refuerzo seleccionados se funde, se mezclan y son expulsados a través de un dado, el cual les dará la forma deseada. Mientras que en el proceso de inyección se pueden obtener piezas de formas complejas [30].

1.4.1 Moldeo por extrusión

La extrusión se refiere a cualquier operación donde se realiza la transformación de un material polimérico que es forzado a atravesar una boquilla para obtener un perfil de sección transversal constante [31]. Las máquinas encargadas de realizar este proceso se las conoce como extrusoras. Sirven para dos propósitos principales: homogenizar la mezcla matriz-refuerzo y darle forma al perfil.

Existen extrusoras de pistón y de tornillo, pero estas últimas son empleadas en mayor medida ya que son más eficientes en cuanto a la fusión del material. La extrusoras de tornillo pueden tener uno o dos tornillos de Arquímedes los cuales se encuentran dentro de un cilindro que es calentado generalmente por resistencias eléctricas. La parte principal de las extrusoras es el sistema cilindro-tornillo que por la fricción debido al giro compacta el material sólido dando lugar a su fusión y lo transporta hacia la boquilla de conformado, todo esto mientras se realiza el mezclado del material.

Las partes principales de una extrusora son: motor eléctrico, tolva, cilindro, resistencias eléctricas, tornillo, cabezal y boquilla como se observa en la Figura 1.6.

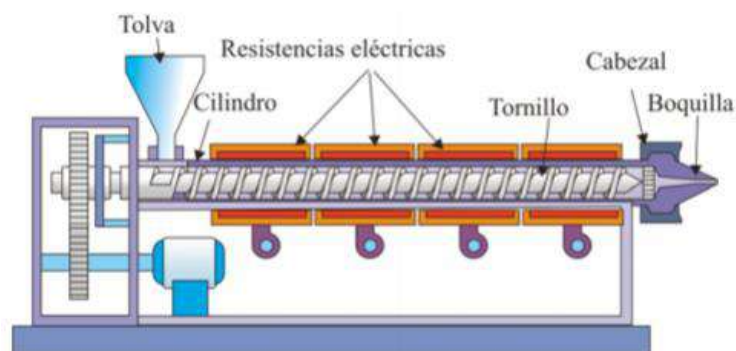


Figura 1.6. Representación de una extrusora
Fuente: [32]

Los pasos de trabajo de una extrusora de tornillo:

- Ingresar los diferentes parámetros tales como: velocidad de el/los husillo/s principal/es, velocidad de alimentación principal, velocidad de alimentación de tolva secundaria (en caso de realizar una mezcla), rango de temperatura (esperar que se alcance las temperaturas y se estabilicen) y presión.
- Colocar el material en la tolva principal y el refuerzo en la tolva secundaria (en caso de realizar material compuesto).
- Trasportar el material de la zona de alimentación hasta la zona de dosificación.
- Presionar el material a través de la boquilla.
- Enfriar la pieza
- Pelletizar (de ser el caso)

Las extrusoras de un solo husillo llamadas también mono-husillo son empleadas principalmente para la obtención de perfiles, mientras que las de doble husillo son utilizadas para realizar la mezcla de materiales. Las extrusoras de un solo husillo son las más empleadas por su bajo costo y eficiencia, sin embargo, las extrusoras de doble husillo presentan ventajas significativas durante el proceso como su buena capacidad de mezclado y desgasificación [32]. Existe una gran variedad de extrusoras de doble husillo dependiendo del giro del tornillo y del grado de interpenetración. Aquellas que sus husillos giran en el mismo sentido llamadas extrusoras de doble husillo con giro paralelo y aquellas a las cuales sus husillos giran en sentido contrario son extrusoras de doble husillo con giro contrario. Estos últimos son los más empleados porque producen mayor fuerza de cizalla lo cual favorece la homogenización de materiales. En la Figura 1.7 se pueden observar los sentidos de giro de las extrusoras de doble tornillo.

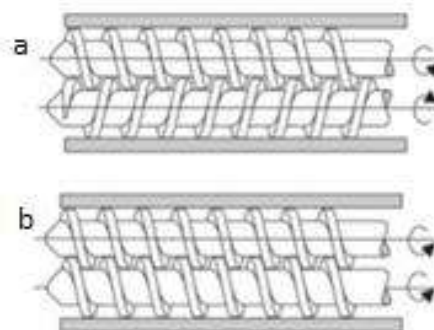


Figura 1.7. Giros de tornillos a) giro contrario b) giro paralelo.
Fuente: [32]

Toda extrusora tiene al menos tres zonas: alimentación, transición o compresión y dosificación [33].

La zona de alimentación es la más próxima a la tolva ya que se encuentra conectada directamente a la salida de esta. Su objetivo principal es compactar el material y transportarlo hacia la siguiente zona a una velocidad adecuada además de precalentarlo. La zona de transición o compresión es una zona intermedia en la cual se produce la fusión del material debido a la fricción generada por el contacto entre el material y el cilindro gracias a la acción del o los tornillos. A medida que el material se va compactando, el aire y otros gases que podrían producirse escapan del cilindro. En la zona de dosificación el material fundido es homogenizado y presurizado para atravesar la boquilla que se encuentra en el cabezal de extrusión.

1.4.2 Moldeo por compresión

Este proceso sirve para procesar materiales termoestables y termoplásticos mediante el uso de moldes del tipo macho y hembra [2]. Cuando se emplea una matriz termoestable en el desarrollo de materiales compuestos es un proceso posterior a la extrusión donde se homogenizó previamente el material.

Los pasos para su realización son:

- Rociar/cubrir el molde con un agente desmoldante.
- Calcular la cantidad de material dependiendo de las dimensiones del molde y especialmente del espesor requerido.
- Colocar el material (previamente homogenizado) en forma de pellets dentro del molde.
- Cerrar el molde y ubicarlo en una prensa calefactora.
- Aplicar la presión de moldeo una vez que se haya alcanzado la temperatura de fusión.
- Retirar la presión de moldeo.
- Enfriar el molde hasta que el material se haya solidificado por completo.
- Retirar la pieza del molde

El moldeo por compresión es un método empleado para obtener piezas planas. Entre sus ventajas se tiene el hecho de que se puede trabajar a pequeña escala ya que sus moldes son más sencillos que los empleados en inyección, motivo por el cual es uno de los procesos más empleados en el desarrollo de materiales compuestos por su bajo costo [2]. La principal

desventaja es la elaboración únicamente de piezas simples, las cuales necesitan de un proceso secundario de desbaste o corte por láser. Al ser proceso manual genera tasas de producción bajas en comparación con la inyección.

1.4.3 Moldeo por inyección

Es un proceso similar al de extrusión con la diferencia de que el material presurizado por el tornillo es depositado en las cavidades de un molde, al fluir el material fundido este empuja al aire hacia afuera y se mantiene cerrado el molde a presión, conocida como presión de empaque, y finalmente se enfría el molde [34].

Las principales ventajas de este proceso es que es automático, alcanza grandes volúmenes de producción, permite obtener piezas de formas complejas, con un alto control dimensional con buen acabado, lo que significa que elimina procesos finales de desbaste [35]. Su principal desventaja es el alto costo del equipo lo cual conlleva a que su uso sea en industrias de alta producción. Y sus moldes tienen costos altos por lo cual no se puede cambiar el diseño del molde con mayor frecuencia.

2. METODOLOGÍA

En el presente capítulo se identifican los materiales, equipos, procedimiento y normas utilizadas para la obtención de materiales compuestos. De igual manera se muestran las propiedades principales de cada material según su ficha técnica.

Antes de la caracterización de los materiales compuestos, se procede a revisar los parámetros usados durante los procesos de extrusión y compresión. Todos estos parámetros son obtenidos de fuentes bibliográficas, donde se detallan los procedimientos que se deben seguir previo a la obtención de materiales compuestos y la utilización de las normas ASTM.

2.1. Materiales utilizados

Para obtener los materiales compuestos, los cuales están formados de una matriz de polipropileno reforzado con endocarpio de coco de la sierra pulverizado, se utilizaron los siguientes materiales.

2.1.1. Matriz

La matriz utilizada es polipropileno homopolímero de la marca Braskem, el cual tiene una denominación H 502HC, el producto es comercializado por NUTEC. En la Figura 2.1 se muestra el polímero en forma de pellets.

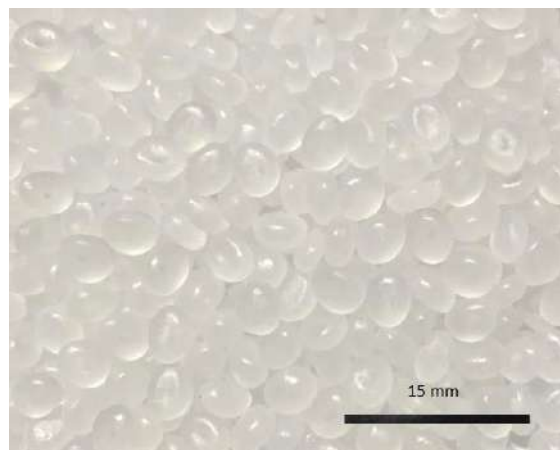


Figura 2.1. Polipropileno H 502HC
(Fuente: Propia)

2.1.1.1. Polipropileno H 502HC

El H 502HC es un homopolímero de bajo índice de fluidez diseñado específicamente para aplicaciones que requieren rigidez extremadamente alta y buena procesabilidad. Tiene

excelente resistencia química y propiedades de barrera. En la Tabla 2.1. se presentan las propiedades del polipropileno, las cuales se deben tomar en cuenta para realizar cualquier tipo de proceso.

Tabla 2.1. Propiedades del polímero (H 502HC)

Característica	Metodo	Unidad	Valores
Densidad	D 792	g/cm ³	0,905
Módulo de flexión, secante al 1%	D 790	MPa	1950
Resistencia a la tracción en el punto de fluencia	D 638	MPa	38
Elongación en el punto de fluencia	D 638	%	7
Dureza Rockwell II (Escala R)	D 785	-	108
Resistencia al impacto Izod a 23 °C	D 256	J/m	25
Temperatura de deflexión termica a 0,455 MPa	D 648	°C	130
Temperatura de deflexión termica a 1,820 MPa	D 648	°C	68
Temperatura de ablandamiento Vicat a 10 N	D 1512	°C	160
Índice de fluidez (230 °C/2,16 kg)	D 1238	g/10 min	3,3

Fuente (Propia)

2.1.1.2. Aplicaciones y procesos

Sus aplicaciones pueden ser base para tapetes, electrodomésticos, empaques para envasado en caliente, piezas con elevada rigidez, platos desechables, vasos, etc. Este tipo de material puede ser empleado en procesos de moldeo por inyección, extracción de rafia, termoformado.

2.1.2. Refuerzo

El material que se utilizó como refuerzo es el endocarpio de coco de la sierra pulverizado, el tipo de coco utilizado se lo conoce como Parajubaea Coccoide (Figura 2.2). La materia prima por utilizar es su endocarpio, se obtiene separando la cáscara la cual está compuesta de exocarpio, mesocarpio y de la pulpa llamada endosperma. Las propiedades de esta variedad de coco no varían significativamente de otras variedades de coco según A. Trujillo (2013) [36]. En la Tabla 2.2 se muestra la composición química del endocarpio de coco.



Figura 2.2. Endocarpio de coco pulverizado
(Fuente: Propia)

Tabla 2.2. Composición del endocarpio de coco

Compuestos identificados	(%)
Celulosa	34
Hemicelulosa	21
Lignina	27
Proteína	2
Grasa	5

(Fuente: [36])

2.1.3. Compatibilizante

El compatibilizante es un elemento que mejora la adhesión entre la matriz y el refuerzo, los cuales son de naturaleza hidrofóbica e hidrofílico respectivamente; para la síntesis de los materiales compuestos se utilizó anhídrido maléico injerto en polipropileno (MAPP) de la marca SIGMA-ALDRICH con propiedades que se muestra en la Tabla 2.3.



Figura 2.3. Polipropileno Maleizado (MAPP)
(Fuente: Propia)

Tabla 2.3. Propiedades del compatibilizante.

Composición	8-10%wt anhídrido maleico
Viscosidad	4 poise (190°C)
Punto de fusión	156°C
Índice de fluidez	47mg KOH/g
Temperatura de transición	157°C
Densidad	0.934 g/mL a 25°C

(Fuente: Propia)

2.2. Procedimiento experimental

Para la obtención y caracterización del material compuesto, se procede a detallar todas las etapas, equipos, ensayos y normas que se utilizaron para obtener los materiales compuestos.

Previo a la síntesis de los materiales compuestos primero se debió procesar el refuerzo. Se recolectó el fruto de las palmas, se peló y extrajo la pulpa para así separar el endocarpio de las demás capas que conforman el fruto. Se secó el endocarpio y finalmente se pulverizó utilizando un molino para obtener el tamaño necesitado.

En el caso de la matriz, primero se mezcló polipropileno con anhídrido maléico injerto en polipropileno (MAPP), esto se lleva a cabo en la extrusora XINDA PSHJ-35, después se realizó el mismo procedimiento con el material de refuerzo. Mediante el moldeo por compresión se obtuvieron tableros de las diferentes composiciones de material compuesto. Finalmente, para obtener las probetas para la caracterización de los materiales compuestos se cortó los tableros según la norma ASTM D638-14 para el ensayo de tracción, de acuerdo con la norma ASTM D790-17 para el ensayo de flexión y según la norma ASTM D256-10 para el ensayo de impacto. Al realizar los ensayos mecánicos se descartó probetas con gran cantidad de imperfecciones, de esta manera se garantizó que los resultados obtenidos sean los más reales posibles. En la Figura 2.4 se muestra en un diagrama de flujo con los pasos y metodología usada para la obtención del material compuesto.

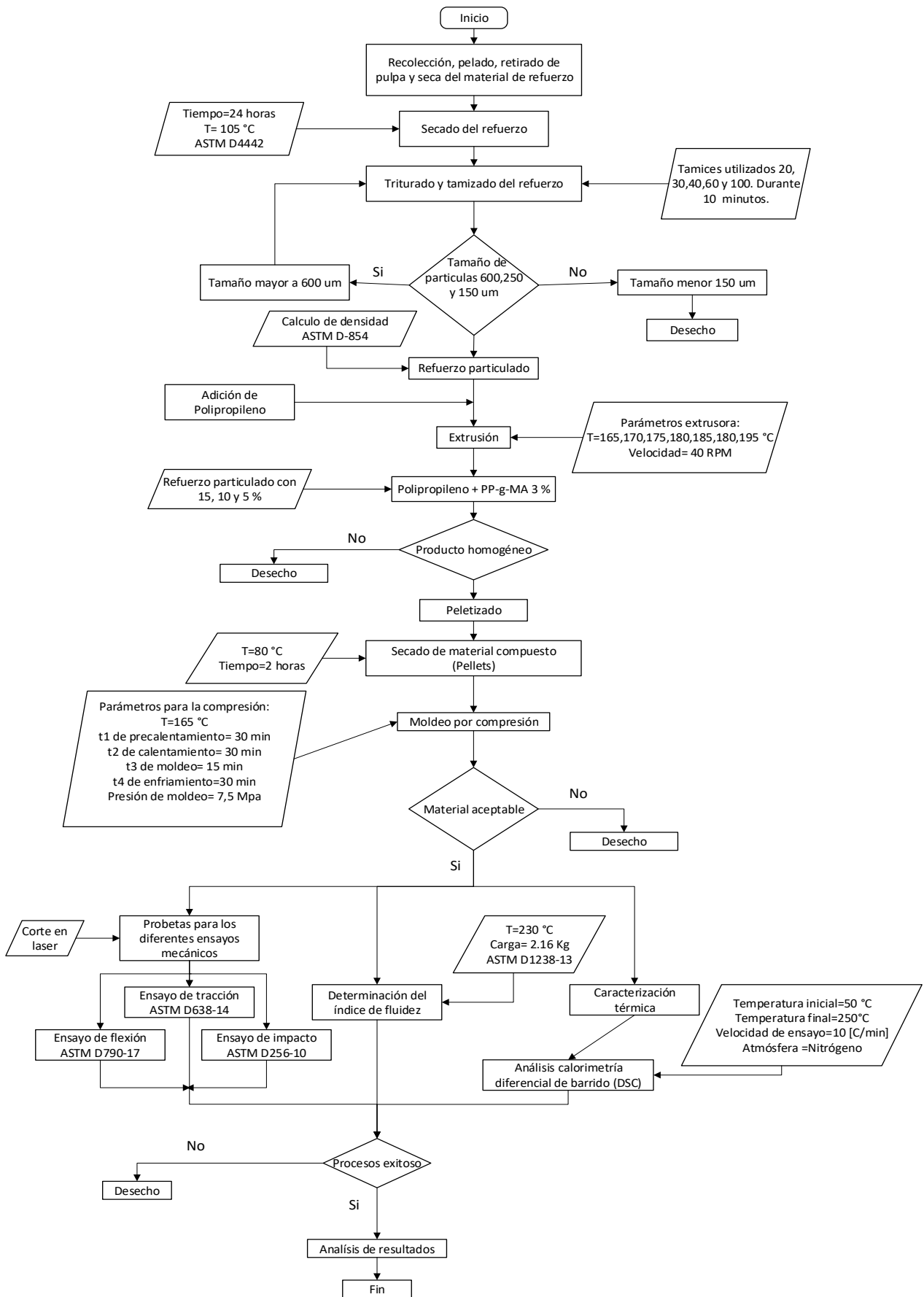


Figura 2.4. Procedimiento para obtener el material compuesto.
(Fuente: Propia)

2.2.1. Estrategia experimental para obtener el material compuesto

En el presente trabajo se analiza la influencia de dos variables dentro de la formulación del material compuesto, el tamaño y porcentaje en peso del refuerzo. En la Figura 2.5 se muestra la nomenclatura para denominar las distintas composiciones. El compatibilizante al ser el mismo en cada composición se omite de la nomenclatura.

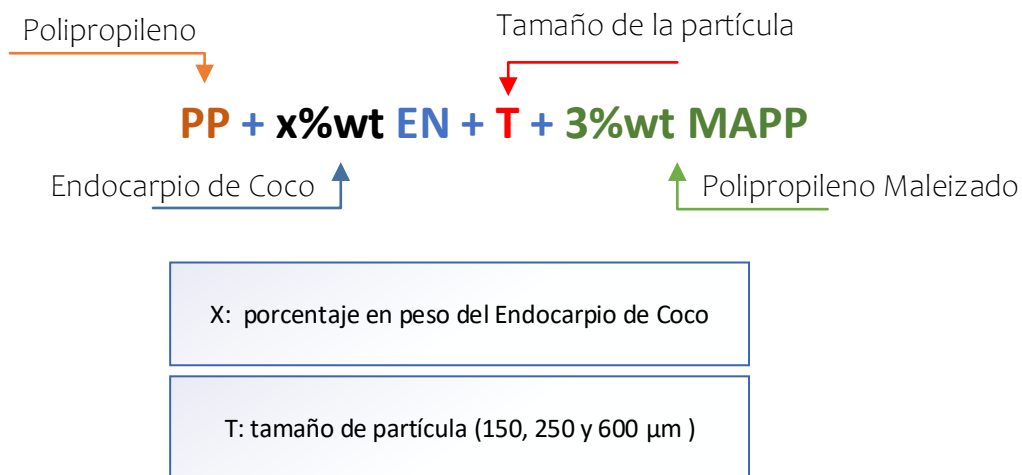


Figura 2.5. Nomenclatura utilizada en las composiciones del material compuesto.
(Fuente: Propia)

2.2.2. Aporte del compatibilizante

El compatibilizante es un aditivo que se incorpora durante el proceso de extrusión. En un estudio realizado por J. Páez (2007) [20], se determinó que la cantidad adecuada que se requiere usar de MAPP es de 3% en wt. Esta cantidad de compatibilizante (MAPP) permite tener mejores propiedades mecánicas como la resistencia a la tracción del material compuesto al mejorar la interfaz entre la matriz y el refuerzo.

2.2.3. Composición en peso y tamaño de la partícula

Se varió el porcentaje en peso del refuerzo, así como también su tamaño. Los porcentajes en peso y tamaño para formular los materiales compuestos a obtener fueron seleccionados en base a estudios de Suapan y Harimi (2003) [19], J. Páez (2007) [20] y Sarki et al. (2011) [21]. En los cuales recomiendan que los porcentajes del refuerzo sean bajos, de manera que las cantidades de refuerzo utilizado son: 5%, 10% y 15% en peso, de igual manera el tamaño seleccionado fue de 150, 250 y 600µm. En la Tabla 2.4 se presentan las combinaciones del refuerzo en tamaño y peso de este, para la obtención del material compuesto.

Tabla 2.4 Composición y nomenclatura de los materiales compuestos.

wt% EN	wt% PP	Tamaño EN (μm)	wt% MAPP	Nomenclatura
-	100	-	-	100%PP
5	92	150	3	5%-150 μm
10	87			10%-150 μm
15	82			15%-150 μm
5	92	250		5%-250 μm
10	87			10%-250 μm
15	82			15%-250 μm
5	92	600		5%-600 μm
10	87			10%-600 μm
15	82			15%-600 μm

(Fuente: Propia)

2.2.4. Desarrollo del material compuesto

Para obtener el material compuesto con las distintas combinaciones seleccionadas se debe seguir varios procesos como pelado, secado, triturado, mezcla de las fases, moldeo por compresión, etc.

2.2.4.1. Recolección, pelado, y separado de la pulpa

Como parte inicial del proceso es la obtención del refuerzo el cual es el endocarpio de coco (EN), esto se lleva a cabo recolectando el fruto el coco de la planta. Una vez recolectado el coco se procede a pelar y a retirar la pulpa de este, esto se llevó a cabo con el uso de una entenalla o un martillo. En la Figura 2.6 se muestra el proceso de cosecha, pelado y separación de la pulpa.



Figura 2.6. Pasos para la obtención del endocarpio de coco (EN). a) recolección, b) pelado, c) separación de la pulpa, d) producto final (EN)

(Fuente: Propia)

2.2.4.2. Secado

Se lo hace con el fin de eliminar el contenido de agua, y de esta forma poder triturarlo con facilidad, para eliminar el contenido de agua hasta el 1% se logra dejando el refuerzo por 24 horas a una temperatura de 105°C de acuerdo con la norma ASTM D-4442. La estufa utilizada en el proceso se muestra en la Figura 2.7 la cual tiene un control de temperatura.



Figura 2.7. Estufa MEMMERT UNB 500 con control de temperatura.
(Fuente: Propia)

2.2.4.3. Trituración

Al obtener el endocarpio de coco (EN) seco, se lo procedió a triturar con el fin de alcanzar un tamaño adecuado para el desarrollo del estudio. Esto se logra utilizando un molino de martillos de marca Karl Kolb Scientific Technical Supplies, el cual trabaja con el principio de trituración por impacto, esto se debe a que cuenta con martillos móviles que giran a gran velocidad que al momento de introducir cualquier material a ser triturado sea impacto a gran velocidad lo cual provoca que se triture. En la Figura 2.8 se puede observar el molino.



Figura 2.8. Molino de martillos.
(Fuente: Propia)

Para alcanza el tamaño requerido se utilizó un tamiz con un diámetro de sus orificios de 4 mm. En la Figura 2.9 se puede observar el tipo de tamiz que se usó.

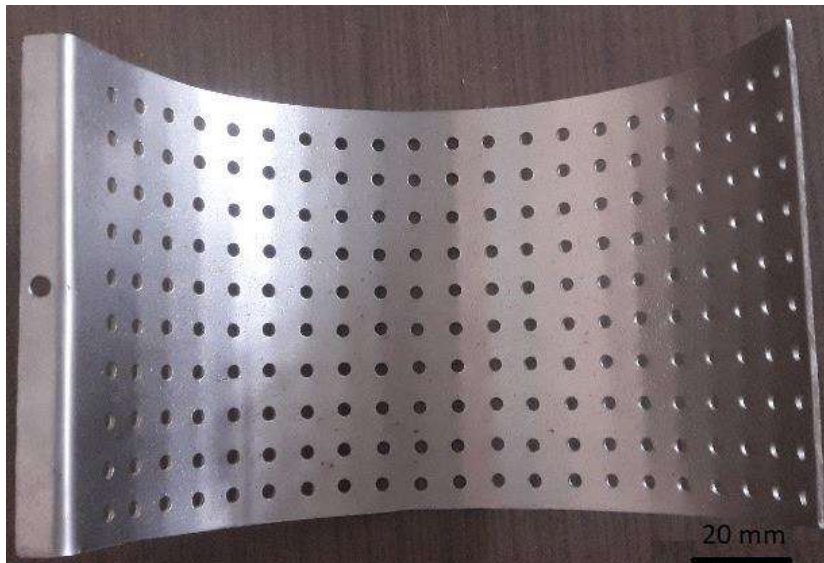


Figura 2.9. Tamiz para el molino de matillos.
(Fuente: Propia)

2.2.4.4. Tamizado

El tamizado es una parte fundamental del proceso, ya que el tamaño de las partículas es una de las variables importante para la obtención del material compuesto, se estudió como varían las propiedades mecánicas al tener diferentes tamaños del material de refuerzo.

Para alcanzar tamaños de 600, 250 y 150 μ m, se empleó un juego de tamices donde se seleccionaron partículas que hayan pasado por las mallas de numeración 30, 60 y 100, estos juegos fueron usados de acuerdo con la norma ASTM E11. Para que las partículas atravesaran estas mallas se debe colocar el juego de tamices en un agitador mecánico (Figura 2.10).



Figura 2.10. Agitador mecánico.
(Fuente: Propia)

Al terminar el proceso de tamizado usando un juego de números 25, 30, 60, 100 y 120 se retiraron las partículas que hayan pasado las mallas número 30, 60 y 100 como se observa en la Figura 2.11.



Figura 2.11. Juego de tamices.
(Fuente: Propia)

2.2.4.5. Extrusión

La extrusión es un proceso mecánico en el cual se somete a un material polimérico a fluir continuamente a través de una boquilla mediante la acción de empuje a presión generado por un tornillo sin fin y con un perfil de temperaturas a lo largo de del proceso, en este punto

se realiza el mezclado de la matriz con el compatibilizante y después con el refuerzo, para lo cual se hace en dos etapas de mezclado.

- Etapa 1: Se mezcla el PP con el MAPP y se pelletiza.
- Etapa 2: Los pellets obtenido en la etapa 1 se vuelen a extruir para que se mezcle con el material de refuerzo, y como paso final se vuelve a pelletizar. En la Figura 2.12 se puede observar un diagrama de las etapas de extrusión.

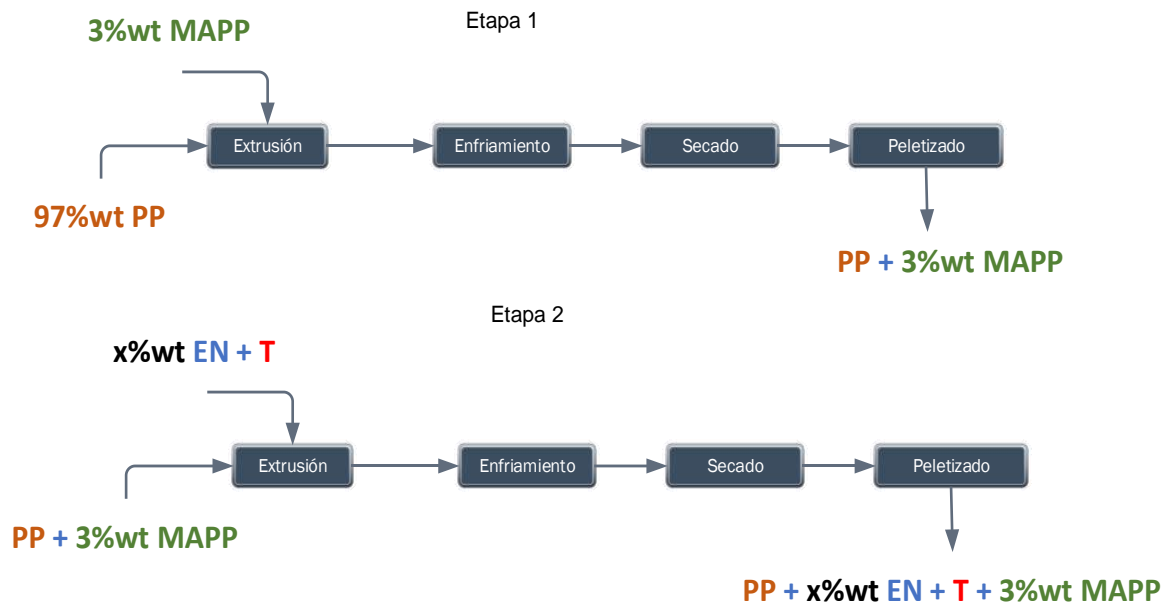


Figura 2.12. Diagramas de las etapas de extrusión.
(Fuente: Propia)

2.2.4.5.1 Extrusora XINDA PSHJ-35

La XINDA PSHJ-35 (Figura 2.13) es una extrusora la cual consta de doble husillo segmentado con un diámetro de 35 mm que se configura con facilidad. Por lo cual se puede extruir altas cantidades de material. Las especificaciones técnicas de la Extrusora XINDA se presentan en la Tabla 2.5.



Figura 2.13. Extrusora XINDA PSHJ-35.
(Fuente: Propia)

El equipo de extrusión consta de varios elementos que permiten realizar la transformación del polipropileno (PP) mezclado con endocarpio de coco (EN) y el compatibilizante (MAPP) en un material compuesto, transformando las propiedades del material inicial. Los principales elementos se detallan a continuación:

- Control Siemens: Es un panel que permite accionar, regular y controlar los parámetros tales como: velocidad del usillo principal, velocidad de alimentación de las tolvas principal y secundario, regular el perfil de temperaturas a lo largo de la extrusión, activar o desactivar la bomba de vacío y de agua y accionar la pelletizadora.
- Tolva de alimentación: El equipo posee dos tolvas de alimentación forzada de tipo Crammer horizontal. Estas tolvas realizan su trabajo mediante el criterio de tolva primaria y secundaria, siendo así la tolva primaria ubicada en la misma línea que el resto de los equipos mientras que la tolva secundaria está ubicada a la derecha de la línea de extrusión. Cabe recalcar que para accionar la tolva secundaria debe estar activa la tolva primaria.
- Extrusor: Extrusora de doble husillo de giro contrario.
- Bomba de agua: Permite controlar la temperatura del extrusor.
- Bomba de vacío: Retira los gases generados en el proceso de extrusión, impidiendo que estos gases se integren en el proceso.
- Bandeja de enfriamiento: Los tallarines que salen de la extrusión por las boquillas son enfriados en esta bandeja que contiene agua, de igual manera conta con 4 rodillos para que los tallarines pueda atravesar por toda la bandeja.

- Enfriador de aire: Elimina la humedad atrapada en el proceso de enfriamiento, de esta forma ingresa seco al área de pelletizado.
- Pelletizado: Siendo este el último proceso que permite cortar los tallarines en pellets, y así poder dar la forma que se requiera.

Tabla 2.5. Especificaciones de la extrusora XINDA.

Marca y modelo	XINDA PSHJ 35 Extrusora de doble tornillo, co-giratoria de tipo dividido
Número de husillos	Doble husillo, tornillo gemelo
Diámetro de husillo	35 mm
Dirección de husillos	Co-giratorio
Relación L/R	40:0
Velocidad máxima del doble usillo	500 RPM
Potencia del motor principal	15 KW
Presión máxima de trabajo/diseño	12/15 MPa
Capacidad de producción	10-50 Kg/h
Peso	1200 Kg
Zonas de calentamiento	7

(Fuente: [37])

2.2.4.5.2 Parámetros de procesamiento

Los parámetros o variables más relevantes que se considera en el proceso para la obtención del material compuesto, estos parámetros son contralados por el panel de control los cuales se ingresan antes del proceso, las variables son:

- Perfil de temperaturas: El perfil de temperaturas son siete zonas de calentamiento, se presentan en la Figura 2.14 la cual se toma la referencia de Vizqueta & Pilaguano (2017) [38] y Da Cunha (2010) [39]. Se emplean como punto de referencia la temperatura de fusión tanto del polipropileno (PP) como la temperatura de degradación del endocarpio de coco (EN). El estudio realizado por A. Trujillo (2013) [36] establece que el endocarpio del coco es térmicamente estable hasta los 195 °C.

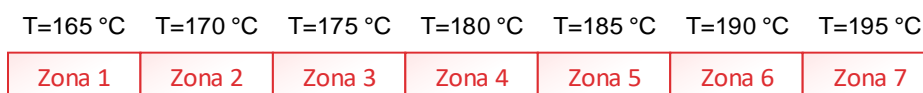


Figura 2.14. Perfil de temperaturas.
(Fuente: [36], [38] y [39])

- Velocidad de usillo co-giratorio: La velocidad debe mantenerse constante en todo el proceso del material, de esta forma garantizar una correcta mezcla entre los componentes de nuevo material (PP-MAPP-EN). La velocidad adecuada se llega a determinar visualmente, al realizar varias cargas de material y haciendo que pase por la extrusora, al observar que los tallarines salgan uniformes y una velocidad en la que se pueda controlar los tallarines para dirigir hacia los rodillos de enfriamiento.
- Velocidades del dosificador principal (tolva principal) y secundario (tolva secundaria): Para obtener diferentes concentraciones del material compuesto se sincronizó el dosificador secundario con el primario, ya que se debe accionar el dosificar primario donde se coloca la matriz (PP), para posteriormente activar el dosificador secundario donde se coloca el refuerzo (EN). Se coloca una cantidad de masa constante de PP en el dosificador primario y a una velocidad constante, se toma el tiempo que tarda en que quede vacío el dosificador primario. Con este tiempo se calcula la velocidad de dosificar secundario. En la Figura 2.15 se detalla cómo se obtiene la velocidad del dosificador secundario con una regla de tres simple.

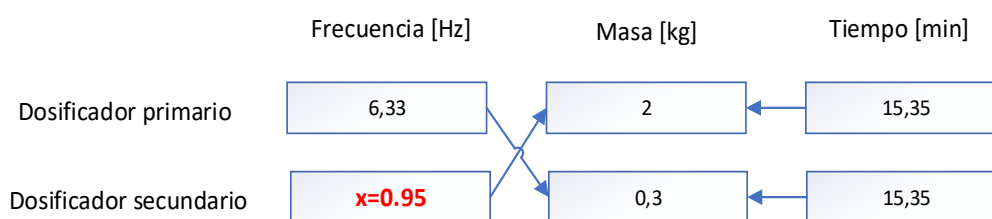


Figura 2.15. Ejemplo de cálculo para el dosificador secundario con EN de 600 μm y 15 wt%.
(Fuente: Propia)

El panel de control que usa la extrusora maneja unidades de frecuencia en lugar de velocidad, es por este motivo que el cálculo se lo hace con frecuencias, de esta forma podemos ingresarlas en el panel de control.

2.2.4.5.3 Enfriado, secado y pelletizado

- Enfriamiento: Al salir los tallarines de la boquilla de extrusión se los enfría en agua contenida en una bandeja a temperatura ambiente aproximadamente 17°C dentro del laboratorio (CIAP). Los tallarines que están dentro de la bandeja con agua se hicieron deslizar por unos rodillos, permitiendo que vayan al área de secado.
- Secado: Los tallarines entran a la cámara de secado donde circula aire forzado por un ventilador. Esto permite que la humedad atrapada en los tallarines por el proceso previo de enfriado se elimine.
- Pelletizado: Los tallarines fueron cortados en una peletizadora donde se obtienen tamaños aproximados de 2 a 3mm como se muestran en la Figura 2.16. Estos pellets ya están listos para la etapa final, que es el moldeo por compresión.



Figura 2.16. Material compuesto pelletizado.
(Fuente: Propia)

2.2.4.6. Elaboración del molde

Se fabricó un molde de tipo macho-hembra, el molde fue hecho de acero A-36 en su totalidad. Los planos se encuentran en el Anexo 3, las dimensiones reales de su cavidad son 150 x 130 x 15mm. Tal como se muestra en la Figura 2.17.



Figura 2.17. Molde hembra-macho.
(Fuente: Propia)

2.2.4.7. Secado previo al moldeo por compresión

La Figura 2.18 muestra pellets del material compuesto antes de ser introducido en la mufla, dicho secado se realizó con el fin de eliminar cualquier exceso de agua que tenga los pellets debido al proceso previo al pelletizado donde los tallarines fueron enfriados con agua. El equipo usado para esta operación fue la estufa mencionada en el acápite 2.2.3.2.

Por el contenido de celulosa y lignina del endocarpio de coco es similar al del bambú se toman en cuenta la temperatura y el tiempo del estudio realizado por Correa y Tuárez (2019) [40]. Una temperatura de 80°C por un tiempo de 24h. De esta forma se trata de evitar que existan defectos de moldeo.



Figura 2.18. Pellets del material compuesto.
(Fuente: Propia)

2.2.4.8. Medición de la densidad del endocarpio de coco

La determinación de la densidad del endocarpio de coco es un proceso fundamental para poder determinar la cantidad de masa de material compuesto que se utilizó durante el moldeo por compresión.

Los cálculos para obtener la densidad del endocarpio de coco pulverizado se basan en lo determinado por la norma ASTM C373-18 (Método de prueba estándar para la absorción de agua, densidad aparente, porosidad aparente y gravedad específica). Los tamaños de las muestras empleadas del endocarpio de coco son: 150, 250 y 600 μ m.

2.2.4.8.1 Descripción de equipos y herramientas utilizadas para obtener la densidad

- Bomba de vacío: Bomba de vacío libre, Marca Rocker, Modelo 610, en la Tabla 2.6 se muestran las características de la bomba.
- Balanza analítica: Marca Scout-Pro, Modelo 2001. Con una capacidad máxima de 2000g, tiene una apreciación de 0,1g.
- Vasos de precipitación: Capacidad de 200 y 600ml y una tolerancia de \pm 5ml.
- Picnómetro y termómetro: Permite conocer la densidad o peso específico de cualquier sustancia según a la norma ASTM D-854.
- Desecador: Contiene una tapa con llave que permite sacar el aire para el vaciado, en la Tabla 2.7 se presenta las características del decantador utilizado. Para desecación y almacenaje de material sensible a la humedad. Bajo la norma ISO 13130.

Tabla 2.6. Especificaciones de la bomba de vacío marca Rocker.

Voltaje (V)	110
Frecuencia (Hz)	60
Max. Potencia (w)	190
Max. Corriente (A)	1,7
Max. Vacío (mmHg)	730
Dimensiones (LxWxH)(cm)	34,1x17,6x19,4

(Fuente: Propia)

2.2.4.8.2 Procedimiento para medir la densidad del endocarpio

El proceso, equipos y herramientas utilizadas para la obtención de la densidad del endocarpio de coco, se explica con un diagrama de flujo presentado en la Figura 2.19.

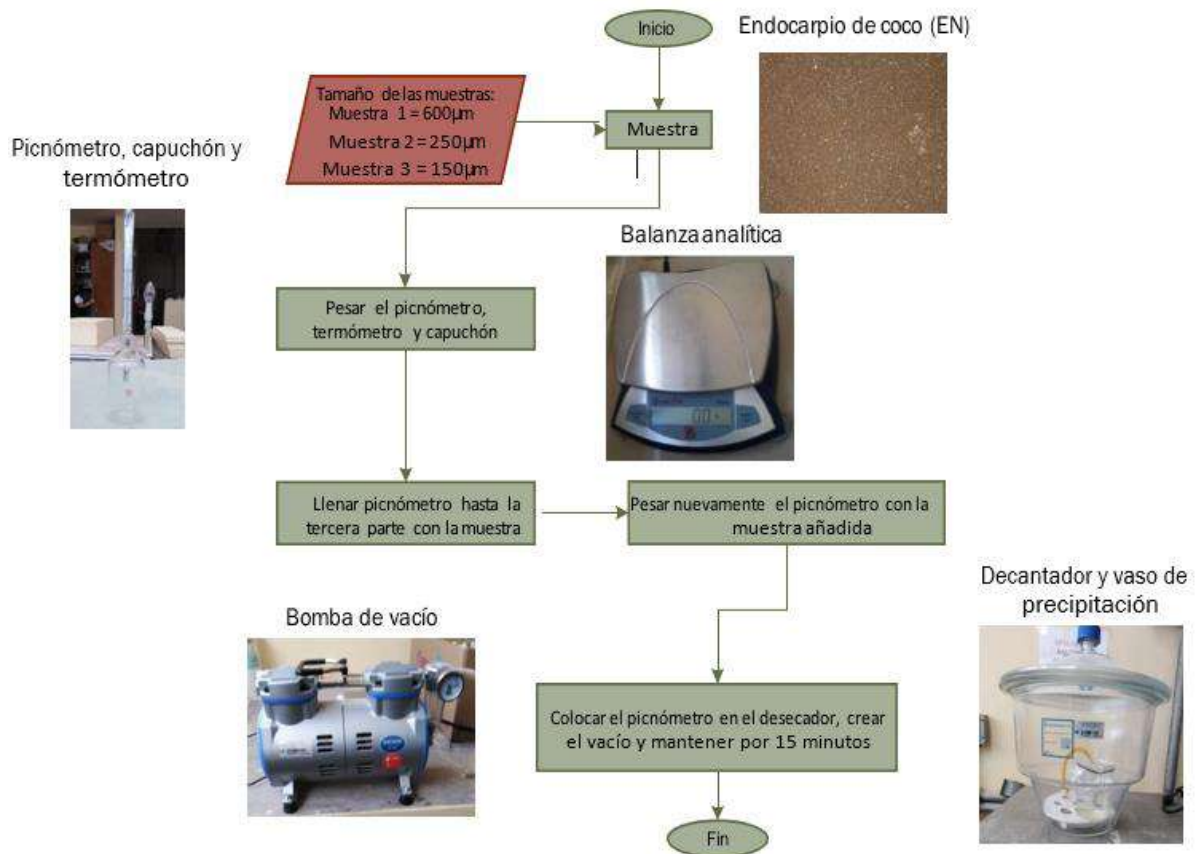


Figura 2.19. Diagrama de flujo para obtener la densidad del endocarpio de coco. (Fuente: Propia)

2.2.4.9. Moldeo por compresión

El proceso final para la obtención del material compuesto es el moldeo por compresión, en el cual se obtuvieron tableros con las dimensiones de largo y ancho dadas por el molde mencionado en el acápite 2.2.4.6, y el espesor requerido de acuerdo con las normas (ASTM D638-14 para el ensayo de tracción, ASTM D790-17 para el ensayo de flexión y ASTM D256-10 para el ensayo de impacto).

2.2.4.9.1 Prensa hidráulica

Para el moldeo por compresión se utiliza una prensa hidráulica de marca J. Wickert & Söhne, modelo Landau-Pfalz. La cual consta con dos placas calefactoras inferior y superior, estas son controladas por un panel de control, en el cual se ingresan las diferentes temperaturas (Figura 2.22) para las placas.

De igual manera posee un sistema hidráulico el cual permite que la placa inferior suba o baje, de esta forma se puede realizar el prensado del material compuesto. En la Figura 2.20 se muestra la prensa hidráulica.



Figura 2.20. Prensa hidráulica.
(Fuente: Propia)

2.2.4.9.2 Descripción de la fase de moldeo

A continuación, se procede a describir detalladamente todas las fases del proceso de moldeo, cabe recalcar que para obtener estos datos se realizó varias pruebas con valores que se usaron en el estudio realizado por J. Páez, (2007) [20]. Se utilizaron diferentes variaciones de temperaturas y tiempos tanto de precalentamiento, calentamiento, moldeo, y enfriamiento hasta que se llegó a los valores mostrados el diagrama de flujo de la Figura 2.22.

- Fase de precalentamiento: En la placa inferior de la prensa se colocó el molde macho y hembra, previamente se vertió la cantidad requerida de pellets en la hembra del molde. Posteriormente prender el panel de control y calentar, tanto el macho como la hembra por separado. Se lo hace con el fin de que se caliente uniforme y progresivamente el molde, y que se liberen gases o humedad atrapada en los pellets.
- Fase de calentamiento: Una vez que los pellets llegan a la temperatura esperar a que toda la cantidad de pellets que se encuentra en el molde se funda.

- Fase de moldeo: Al tener los pellets fundidos por completo se procede a cerrar el molde, y aplicar presión de moldeo.
- Fase de enfriamiento: Para finalizar el moldeo, una vez que terminó el tiempo de prensado, sin quitar la carga de prensado se apaga el sistema de calentamiento y enfriar por medio de aire forzado, utilizando un ventilador de pedestal, el cual se presenta en la Figura 2.21. Una vez que llega a la temperatura ambiente se procede a desmoldear y retirar el tablero del material compuesto.



Figura 2.21. Ventilador de pedestal
(Fuente: Propia)

En la Tabla 2.8 se presentan las especificaciones del ventilador de pedestal marca EVVO, modelo EV-45 con un tipo de control de 3 velocidades.

Tabla 2.7. Especificaciones del ventilador.

Consumo de energía (Kwh/mes)	3,02
Flujo (m ³ /s)	1,04
Diámetro de hélice (cm)	45
Diámetro de rejilla (cm)	50

(Fuente: Propia)

Después de repetir las fases de precalentamiento, calentamiento, moldeo y enfriamiento con diversas magnitudes de temperatura y tiempo se observó que los tableros que menos imperfecciones tenían era los elaborados con los parámetros mostrados en la Figura 2.22.

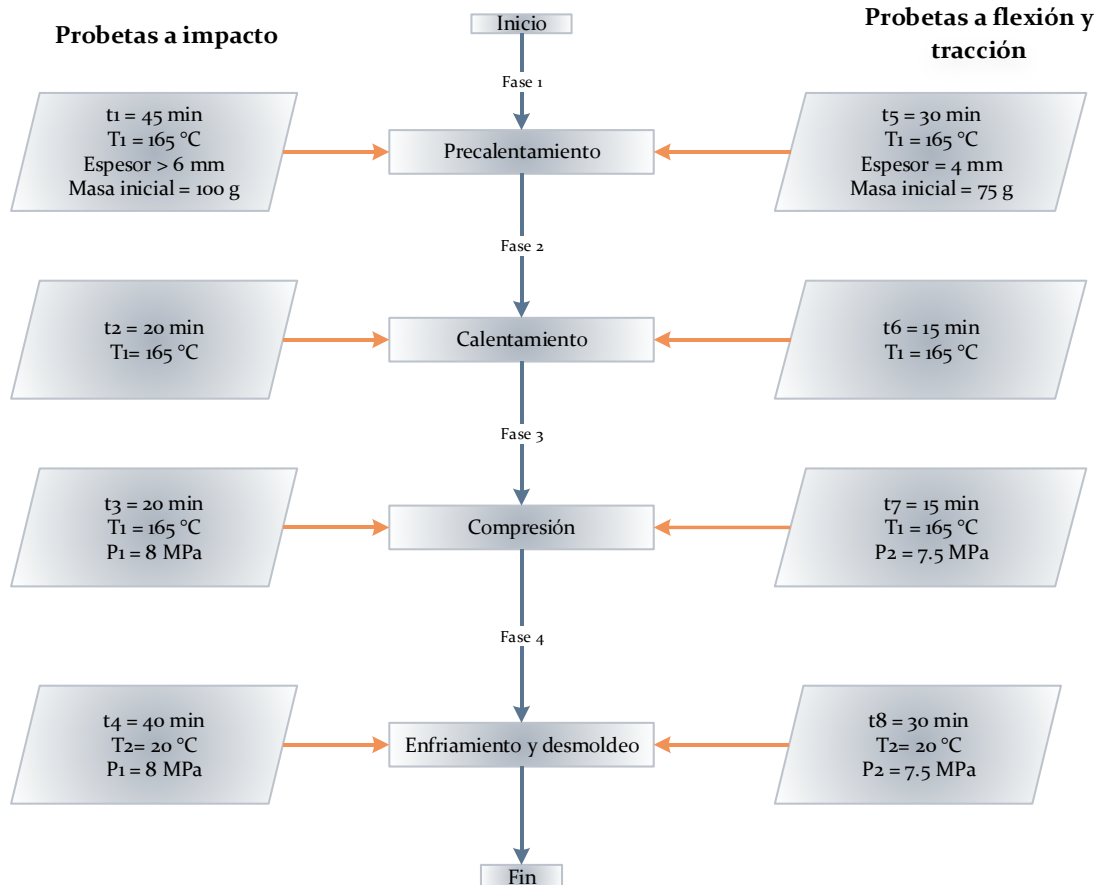


Figura 2.22. Diagrama de flujo para el proceso de moldeo.
(Fuente: Propia)

2.2.5 Caracterización del material compuesto

Para caracterizar el material compuesto obtenido se procedió a realizar probetas de acuerdo con el tipo de ensayo mecánico, térmico y físico que se realiza. Todos los ensayos se realizan siguiendo normas ASTM.

2.2.5.1. Densidad aparente

Se lo realizó bajo la norma ASTM D792-13 mediante inmersión en agua, para ello se empleó una balanza analítica con una precisión de 0,0001g. La densidad se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{m_{seco}}{m_{seco} - m_{liquido}} \rho_{agua} \quad (2.1)$$

Donde:

m_{seco} = peso del material seco

$m_{liquido}$ = peso del material en el líquido

ρ_{agua} = densidad del agua

Los valores obtenidos en el presente ensayo serán comparados con la densidad teórica encontrada a partir de la ley de las mezclas como se muestra en el Anexo 4

2.2.5.2. Obtención de probetas

El siguiente paso una vez que se han obtenidos los tableros mediante el proceso de moldeo por compresión, es obtener las probetas para los distintos ensayos. Las probetas se obtienen mediante corte a láser de acuerdo con la geometría necesaria (según la norma ASTM D638-14 para el ensayo de tracción, ASTM D790-17 para el ensayo de flexión y ASTM D256-10 para el ensayo de impacto). En la siguiente Figura 2.23 se ilustra como queda una probeta para flexión mediante corte por láser.

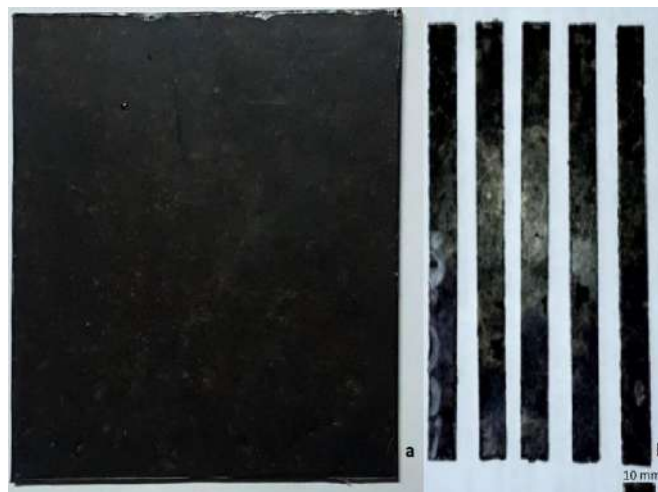


Figura 2.23. a) Tablero obtenido del moldeo por compresión, b) Probeta para flexión obtenida por corte a laser.
(Fuente: Propia)

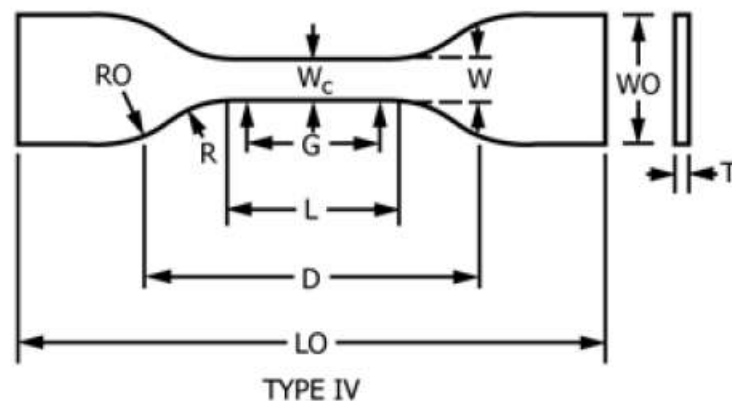
2.2.5.3. Ensayos mecánicos

Los ensayos mecánicos se realizaron con el fin de comprobar cuál es la respuesta que ofrecen los materiales compuestos al ser sometidos a ciertos esfuerzos mecánicos bajo

condiciones dadas por las normas ASTM (D638-14 para el ensayo de tracción, D790-17 para el ensayo de flexión y D256-10 para el ensayo de impacto).

2.2.5.3.1 Ensayo de tracción

Para la ejecución del ensayo a tracción, se realizó bajo la norma ASTM D638-14. Con este método de ensayo se determinan las propiedades a tracción de los plásticos reforzados y no reforzados, se usan probetas estandarizadas. La muestra de prueba es un compuesto reforzado (material compuesto), por lo cual la probeta para el ensayo se ajusta a las medidas de la probeta de tracción Tipo IV. Las dimensiones y geometría de la probeta se muestran en la Figura 2.24. Para ejecutar los ensayos de tracción y flexión se utilizó la máquina universal de ensayos marca INSTRON, modelo 3365 como muestra la Figura 2.25.



Dimensiones de muestras para espesor, T, mm (pulg)B	4 (0.16) o menor	
	Tipo IV ^B	Tolerancia
W— ancho de la sección estrecha ^{E,F}	6 (0.25)	±0.5 (±0.02) ^{B,C}
L— longitud de la sección estrecha	33 (1.30)	±0.5 (±0.02) ^C
W0— ancho total, min ^G	19 (0.75)	+ 6.4 (+ 0.25)
W0— ancho total, min ^G	...	+ 3.18 (+ 0.125)
LO— longitud total, min ^H	115 (4.5)	no max (no max)
G— longitud del indicador ^I	...	±0.25 (±0.010) ^C
G— longitud del indicador ^I	25 (1.00)	±0.13 (±0.005)
D— distancia entre agarres	65 (2.5) ^J	±5 (±0.2)
R— radio de filete	14 (0.56)	±1 (±0.04) ^C
RO— radio exterior (tipo IV)	25 (1.00)	±1 (±0.04)

Figura 2.24. Dimensiones y geometría para probeta de tracción Tipo IV, por la norma ASTM D638-14. (Fuente: ASTM D638-14)



Figura 2.25. Maquina universal de ensayos.
(Fuente: Propia)

Al regirse a la norma ASTM D638-14 se especifica que al menos cinco muestras de prueba para materiales isotrópicos son necesarias, además de descartar las muestras que se fracturen fuera de la zona del extensómetro o con algún tipo de falla. La velocidad de ensayo que se seleccionó fue de 5mm/min el cual cumple con las especificaciones de la norma.

En la Figura 2.26 se muestra el montaje de la probeta para ensayo, una vez montada la probeta se ingresó la velocidad para ejecutar el ensayo.

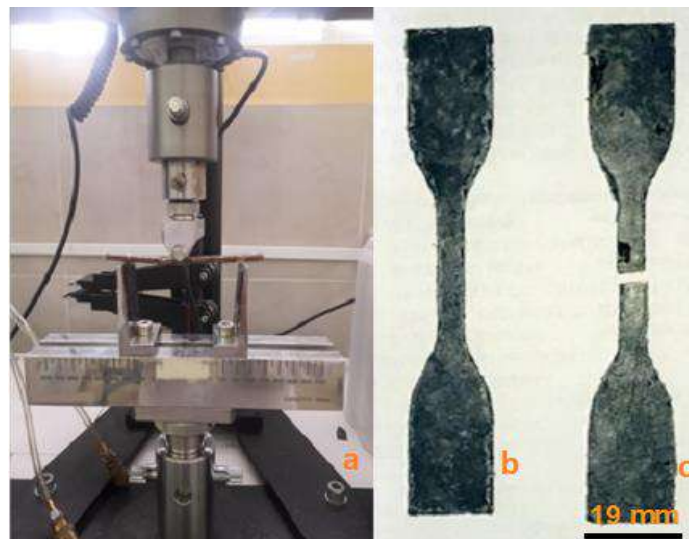


Figura 2.26. a) Montaje de probeta, b) Probeta para tracción, c) Probeta ensayada a tracción
(Fuente: Propia)

Con los datos obtenidos del ensayo se calcula la resistencia a tracción y el módulo de elasticidad, se utilizó las siguientes ecuaciones:

Resistencia máxima a la tracción:

$$\sigma_{max} = \frac{F [N]}{A [mm^2]} \quad (2.2)$$

Donde:

F = fuerza máxima soportada por el material

A = área de la sección transversal

Módulo de elasticidad:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1 [MPa]}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 [mm/min]} \quad (2.3)$$

Donde:

F = fuerza máxima soportada por el material

A = área de la sección transversal

σ_2, σ_1 = porción inicial de la curva esfuerzo – deformación

$\varepsilon_2, \varepsilon_1$ = deformación correspondiente a los esfuerzos

Para obtener un mejor resultado, los datos obtenidos de las muestras se calcula la media aritmética de cada propiedad estudiada y su desviación estándar.

2.2.5.3.2 Ensayo de flexión

Para el ensayo de flexión se utilizó la norma ASTM D790-17, permite determinar las propiedades a flexión de plásticos reforzados y no reforzados. Para realizar el ensayo se utiliza un sistema de 3 puntos de carga, el cual se aplica una carga a una viga con soportes simples. La probeta para ensayar reposa sobre 2 apoyos en una posición horizontal y la carga se aplica por un tercer apoyo móvil superior, el cual se encarga de deformar la probeta aplicada la carga en el centro de los dos soportes.

La norma específica que se debe ensayar al menos cinco muestras para un material isotrópico, además se establece una relación entre el espesor de la probeta y la distancia entre los apoyos de 1:16. La probeta debe ser lo suficientemente larga para que cada extremo sobresalga en al menos 10% de sus apoyos, de esta forma se evita que la probeta se deslice y salga de sus apoyos. En la Figura 2.27 se muestran las dimensiones y geometrías de la probeta.

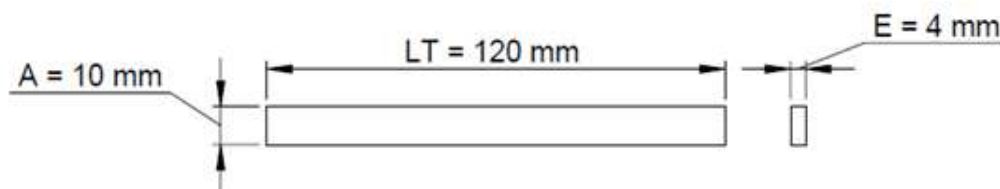


Figura 2.27. Probeta con dimensiones y geometrías para flexión.
(Fuente: Propia)

Los parámetros para realizar el ensayo de flexión bajo la norma ASTM D790-17, especifica una velocidad de 2mm/min y una fuerza máxima registrada en (N). El montaje de la probeta, así como el antes y después del ensayo de flexión se presenta en la Figura 2.28.

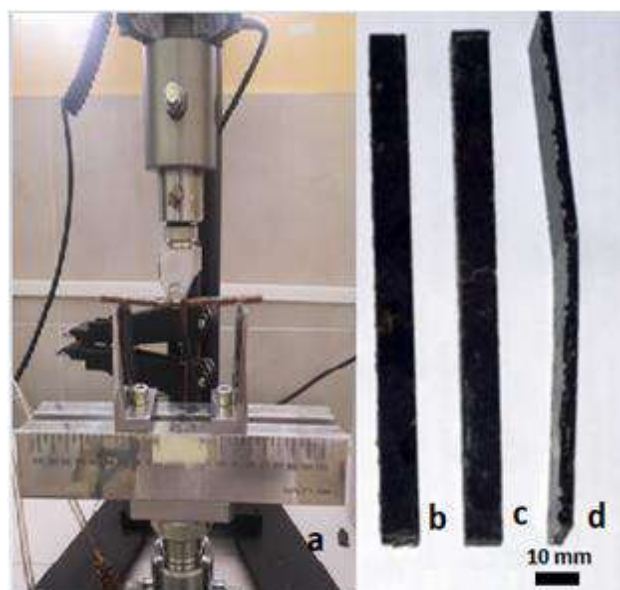


Figura 2.28. a) Montaje de la probeta a flexión, b) y c) probeta antes de realizar el ensayo a flexión, d) probeta después de realizar el ensayo a flexión.
(Fuente: Propia)

Al obtener los resultados del ensayo de flexión se procede a determinar la resistencia a la flexión y el módulo de flexión, se utilizó las siguientes ecuaciones:

Resistencia a la flexión:

$$\sigma \text{ (MPa)} = \frac{3PL \text{ [MPa]}}{2bd^2 \text{ [mm}^2\text{]}} \quad (2.4)$$

Donde:

σ = esfuerzo de la fibra o la capa más externa

P = fuerza máxima aplicada sobre el material

L = distancia ente los apoyos

b = ancho de la probeta

d = espesor de la probeta

Para obtener un mejor resultado, los datos obtenidos de las muestras se calcula la media aritmética de cada propiedad estudiada y su desviación estándar.

2.2.5.3.3 Ensayo de impacto

El ensayo a impacto se realizó bajo la norma ASTM D256-10, dentro de la cual hay 4 métodos. Se selecciona el método E ya que la probeta no posee una muesca, además la resistencia del material es baja. La geometría y dimensiones de la probeta se muestran en la Figura 2.29.

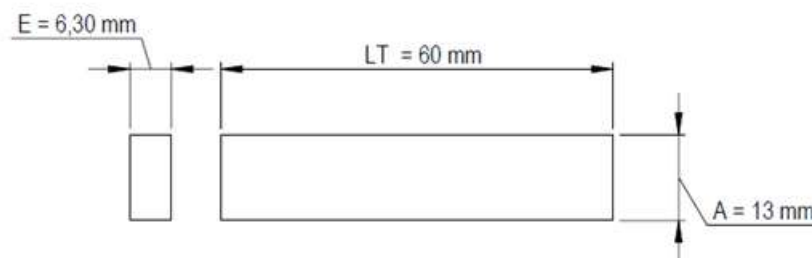


Figura 2.29. Geometría y dimensiones para probetas a impacto.
(Fuente: Propia)

Para la ejecución del ensayo se empleó la máquina de ensayos de impacto Tinius Olsen IT 504 mostrado en la Figura 2.30. La máquina fue calibrada con una energía nominal del péndulo de 2.7811J.

Al terminar de calibrar la máquina, se procedió a colocar la probeta en las mordazas y se libera el péndulo impactando en la misma.

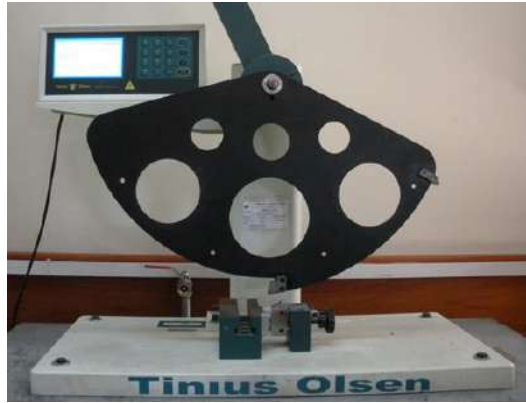


Figura 2.30. Máquina para ensayos de impacto Tinus Olsen IT 504.
(Fuente: Propia)

2.2.5.4. Calorimetría diferencial de barrido

Este ensayo se realizó a dos muestras, siendo el material virgen y el que obtuvo mejores propiedades mecánicas, dicho análisis será abarcado ampliamente en el Capítulo 3. En la Tabla 2.9 se muestran las composiciones seleccionadas para el análisis térmico.

Tabla 2.8. Composiciones utilizadas para el ensayo térmico.

Composiciones
100%PP
15%-600 μ m

(Fuente: Propia)

Este ensayo permite determinar la temperatura de transición vítrea, así como el porcentaje de cristalinidad del material a ensayar como una función del tiempo y la temperatura. Proporciona también información cuantitativa y cualitativa de las propiedades endotérmicas (absorción de calor) y exotérmica (emisión de calor) [41].

Para la ejecución del ensayo se utilizó una muestra que tenga una masa mayor a 5mg y que ocupe un volumen máximo de un disco de diámetro 4 mm y un espesor de 2mm, esto con el fin de tener mayor precisión en el ensayo. Para que el calor se disperse uniformemente por toda la masa de la muestra la cápsula de aluminio donde fue colocada la muestra es sellada con una tapa del mismo material. Como paso final se coloca la cápsula que contiene la muestra y una cápsula vacía como referencia en un crisol del equipo de DSC. El equipo empleado fue el DSC Q2000 de la marca TA Instruments que se muestra en la Figura 2.31.



Figura 2.31. DSC Q2000 TA Instruments.
(Fuente: Propia)

En la Tabla 2.10 se muestran los parámetros que se utilizaron para el desarrollo del ensayo DSC, estos parámetros se aplican para las composiciones mencionadas en la tabla anterior.

Tabla 2.9. Parámetros para el ensayo DSC.

Parámetro	Valor	Unidad
Temperatura Inicial	-50	[°C]
Temperatura Final	250	[°C]
Tasa de calentamiento y enfriamiento	10	[°C/min]

(Fuente: Propia)

Para verificar el efecto del refuerzo sobre la matriz del material compuesto, como primer paso se realizó el ensayo a la muestra de polipropileno sin refuerzo (100%PP), para después realizar el ensayo al material compuesto (15%-600µm), el cual fue seleccionado por poseer las mejores características mecánicas. Para determinar el grado de cristalinidad de las muestras ensayadas por DSC, se empleó la siguiente ecuación:

$$X_c = \frac{\Delta h_{m,100\%}}{\Delta h_{m,exp}} * 100 \quad (2.4)$$

Donde:

$\Delta h_{m,100\%}$ = entalpia de fusión del 100%PP cristalino =170 J/g

$\Delta h_{m,exp}$ = entalpia de fusión del material compuesto

2.2.5.5. Índice de fluidez

Al índice de fluidez se lo conoce también como MFI (*Melt Flow Index*), se basa en la cantidad de material en peso que fluye a través de un capilar durante un cierto tiempo, para unas condiciones de temperatura y de presión establecido por la norma ASTM D 1238. Las razones de importancia del índice de fluidez para la industria son: determinar la procesabilidad de un material, en la cual relaciona la viscosidad, la fluidez a bajas velocidades de deformación, densidad a la temperatura del ensayo, pero principalmente el MFI relaciona el peso molecular y, por tanto, las propiedades del material. Asegura que el material tenga un correcto peso molecular y que ha sido fabricado dentro de un rango de pesos moleculares lo que conlleva a que las propiedades de las piezas fabricadas serán las esperadas. Conocer el MFI de piezas ya procesadas para compararlo con el MFI de pellets virgen sirve para medir el nivel de degradación que ha sufrido un material durante el procesamiento y que pérdida de peso molecular ha sufrido [42]. Se asume que, durante el proceso de inyección y extrusión, el husillo, la cizalla o el calor, producen rotura de moléculas y, por tanto, pérdida de peso molecular. Se considera aceptable una variación en el MFI del orden del 20% al 30% [43].

Para realizar el ensayo de fluidez se utilizó un equipo de marca INSTRON, modelos CEAST MF30, el cual se ilustra en la Figura 2.32. El plastómetro se compone por una unidad calefactora eléctrica que controla la temperatura en la zona de alimentación, intermedia y salida del material.



Figura 2.32. Medidor de fluidez INSTRON CEAST MF30.
(Fuente: Propia)

En la Tabla 2.11, se presentan las condiciones para determinar la fluidez del material compuesto el cual está bajo la norma ASTM D 1238-13.

Tabla 2.10. Condiciones para determinar el índice de fluidez.

Condiciones	Valor
Temperatura (°C)	230
Carga (kg)	2.16
Longitud del dado (mm)	8
Diámetro del dado (mm)	2.095
Pre calentamiento sin carga (s)	300
Pre calentamiento con carga (s)	240
Pre calentamiento total (s)	540
Tiempo entre corte (s)	60
Número de cortes	5

(Fuente: Propia)

Una vez definidos los parámetros se procede a desarrollar el ensayo, en el interior del cilindro calefactor se aloja un canal cilíndrico en el cual se vertió pellets de los materiales compuestos, para que se puedan fundir. Una vez fundidos los pellets, se introdujo un émbolo desmoldeable, este empuja al material fundido con la carga establecida. El material fundido sale por una boquilla alojado en la parte inferior. Para determinar el MFI, es necesario medir la masa de material fundido que atraviesa la boquilla en un tiempo determinado.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos de densidad del endocarpio, índice de fluidez, ensayos mecánicos y térmico de los materiales compuestos. Se analizó la influencia del tamaño del refuerzo, así mismo cómo afecta el porcentaje de este en las propiedades finales de los materiales compuestos en comparación con las propiedades de la matriz mediante un análisis estadístico. Finalmente se realiza una comparación con estudios similares donde emplean endocarpio de coco pulverizado como refuerzo.

Para determinar si el tamaño o porcentaje en peso del refuerzo provocan una influencia significativa en los resultados de los diferentes ensayos realizados se empleó el método de análisis de la varianza (ANOVA) con un nivel de confianza del 95% (nivel de significancia de 0,05). Este tipo de análisis estadístico plantea la hipótesis de la igualdad de las medias, conocida también como hipótesis nula. Se rechaza la hipótesis nula cuando el valor p calculado es menor que el nivel de significancia (0,05) caso contrario, se la acepta. Cuando se rechaza la hipótesis nula quiere decir que existe un efecto significativo de las variables independientes sobre la variable dependiente. Cuando se acepta la hipótesis nula significa que las variables independientes no tienen influencia significativa sobre la variable dependiente.

3.1. Desempeño del molde

Para el diseño del molde se toma como referencia el trabajo realizado por J. Páez (2007) [20], del cual se realizan ciertas modificaciones con el fin de abaratar costos y por el diferente tipo de prensa utilizada, este debe ser robusto para poder soportar las presiones de moldeo. El plano con las dimensiones y geometría se detallan en el Anexo 2.

A partir de las temperaturas, presiones y tiempos definidos en el apartado 2.2.4.9.2 (Figura 2.22), se fabrican tableros para la obtención de las probetas para los diferentes ensayos mecánicos. Se pesa la masa inicial y la masa final después de terminado el moldeo, de esta forma se evalúa el desempeño del molde, ya que al tener una holgura entre el macho y la hembra del molde se tiene un desperdicio de material. En la Tabla 3.1 se muestra la cantidad de masa desperdiciada.

Tabla 3.1. Porcentaje de masa desperdiciada durante el moldeo.

Tipo de probeta	Tiempo de moldeo (min)	Temperatura de moldeo (°C)	Presión (MPa)	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Masa desperdiciada (%)
Tracción	15	165	7,5	75	55	26,7
Flexión	15	165	7,5	75	55	26,7
Impacto	20	165	8	100	73	27,0

(Fuente: Propia)

Previo a establecer las variables de moldeo se realizaron diferentes pruebas cambiando las variables principales como presión, tiempos y temperaturas, se obtuvo diferentes fallas como: falta de fusión, burbujas internas, falta de material, etc. En la Figura 3.1 se puede observar algunas fallas obtenidas en el polipropileno.

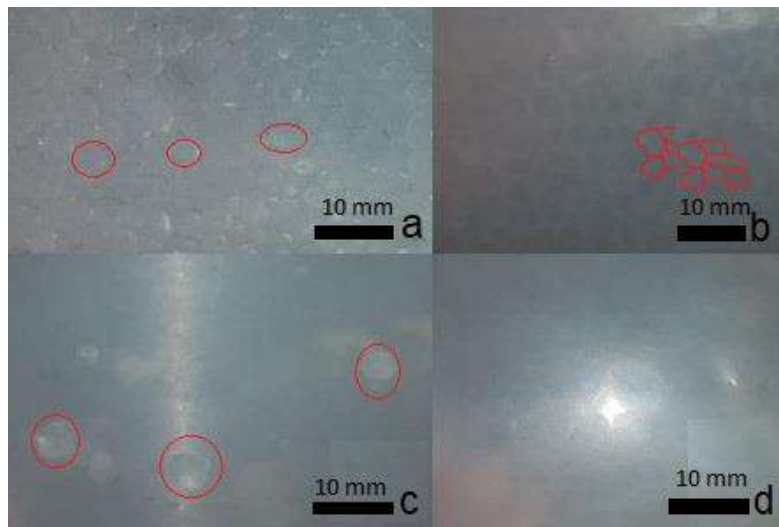


Figura 3.1. Tableros con fallas más relevante para el PP al 100%, a) Falta de fusión, b) Tiempo insuficiente para la fusión, d) burbujas internas, c) Tablero sin imperfecciones.

(Fuente: propia)

3.2. Imperfección del material compuesto

Al moldear los pellets del material compuesto con las variables obtenidas en el acápite 3.1 y también variar las mismas, no se pudieron obtener tableros sin imperfecciones, como se muestra en la Figura 3.2. Por lo cual se decidió realizar el estudio con los tableros con menos imperfecciones.

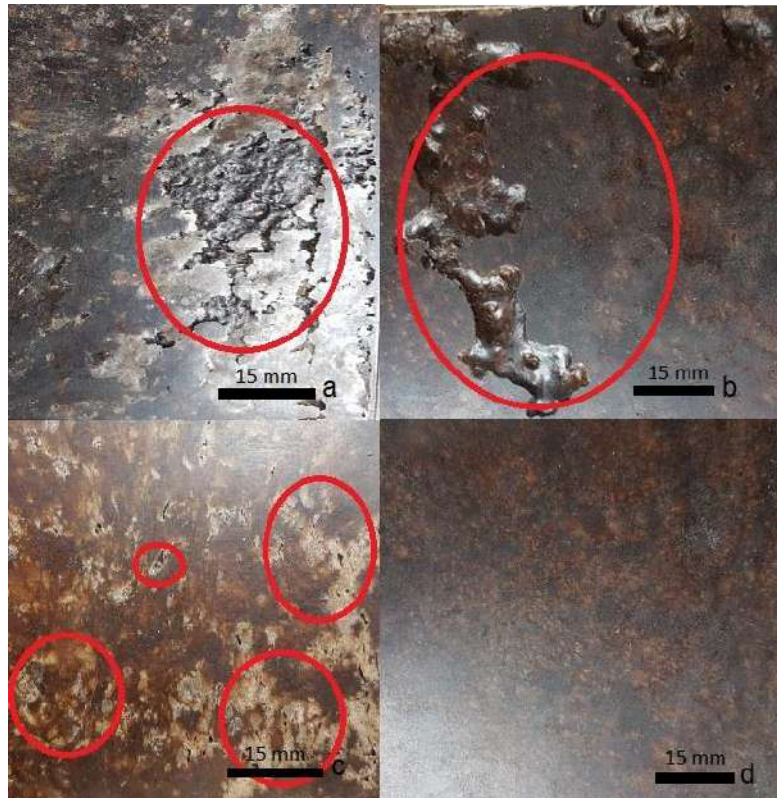


Figura 3.2. Tableros del material compuesto, a) Falta de material y presión, b) Falta de material, c) Aire atrapado dentro, d) Tablero con menos porosidades.
(Fuente: Propia)

Estas porosidades no se pudieron evitar por los siguientes factores. Al alcanzar temperaturas superiores a 140°C los enlaces de lignina se empiezan a degradar, provocando gases como muestra en el estudio realizado por M. Sifontes y M. Domine (2013) [44]. En el proceso de extrusión se alcanza una temperatura máxima de 195°C. Durante dicho proceso se generaron gases producto del aumento de temperatura. Estos gases quedaron atrapados en los tallarines de los materiales compuestos después del proceso de extrusión provocando las porosidades en la parte interior de los tableros mostrados en la Figura 3.2.

En la Figura 3.3 se puede observar que la lignina presente en los materiales reacciona ante diversos métodos de procesamiento provocando la aparición de gases como CO, CO₂, H₂ o CH₄ durante dichos procesamientos.

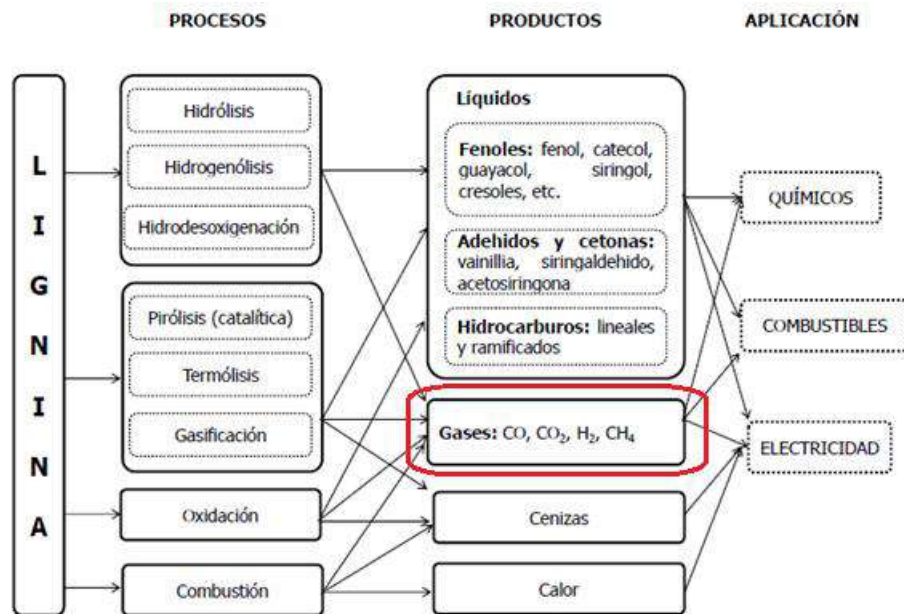


Figura 3.3. Esquema de procesos termoquímicos para transformación de la lignina y sus productos potenciales. (Fuente: [44]).

3.3. Determinación de la densidad del endocarpio de coco

Los resultados de densidad del endocarpio de coco para 250 μ m se muestran en la Tabla 3.2. Se determinó esta densidad según el acápite 2.2.4.8.1, al ser necesaria para encontrar la densidad teórica de los diferentes materiales compuestos. Se aprecia en la tabla que la densidad para un tamaño de 250 μ m es de 10,4415 g/cm³.

Tabla 3.2. Densidad del endocarpio de coco, para un tamaño de 250 μ m.

m_1 (g)	m_2 (g)	m_3 (g)	m_4 (g)	Vol (cm ³)	Densidad (g/cm ³)	Promedio (g/cm ³)
48,87	54,58	102,11	100,31	3,91	12,4987212	10,4415
48,87	56,17	102,57	100,28	5,01	9,75449102	
48,87	55,46	102,27	100,3	4,62	10,5779221	
47,64	54,52	101,45	99,3	4,73	10,0718816	
47,64	54,92	101,52	99,36	5,12	9,3046875	

(Fuente: Propia)

3.4. Caracterización de la matriz

La caracterización mecánica del polipropileno se la realiza con la intención de conocer varias de sus propiedades mediante la aplicación de ensayos de tracción, flexión, impacto y un

análisis térmico de calorimetría diferencial de barrido (DSC). Cada uno de los cuales se ejecutó según las normas detalladas en el Capítulo 2.

3.4.1. Ensayo de tracción

Este ensayo se realizó de acuerdo con la norma ASTM D638, en la cual señala que se debe realizar el ensayo al menos a 5 probetas, asegurando así una correcta realización del mismo.

En la Tabla 3.3 se listan los resultados (promedio) obtenidos después de la realización del ensayo de tracción de las probetas de 100%PP (polipropileno puro). Entre las propiedades obtenidas se muestra la resistencia a la tracción, elongación en el punto de fluencia, resistencia a la tracción en rotura, elongación máxima y el módulo de elasticidad. Cada uno con su respectivo coeficiente de variación (C.V.), los cuales presentan un valor menor de 30%, lo que significa un buen grado de repetitividad.

Tabla 3.3. Propiedades mecánicas del polipropileno obtenidas mediante el ensayo de tracción.

Composiciones	Resistencia a la tracción		Elongación en el punto de fluencia		Resistencia a la tracción en rotura		Módulo de elasticidad	
	[MPa]	C.V.	[%]	C.V.	[MPa]	C.V.	[MPa]	C.V.
100%PP	26,1	5,17	2,7	27,75	25,5	3,56	1582,9	9,47
Ficha técnica	38	-	7	-	-	-	-	-

(Fuente: Propia)

En la Figura 3.4 se muestra la curva de esfuerzo vs. deformación de las probetas 100%PP. La Figura 3.5 indica el estado de una probeta de 100%PP después del ensayo. Se observa que la deformación es baja; su elongación final fue de 4,7%

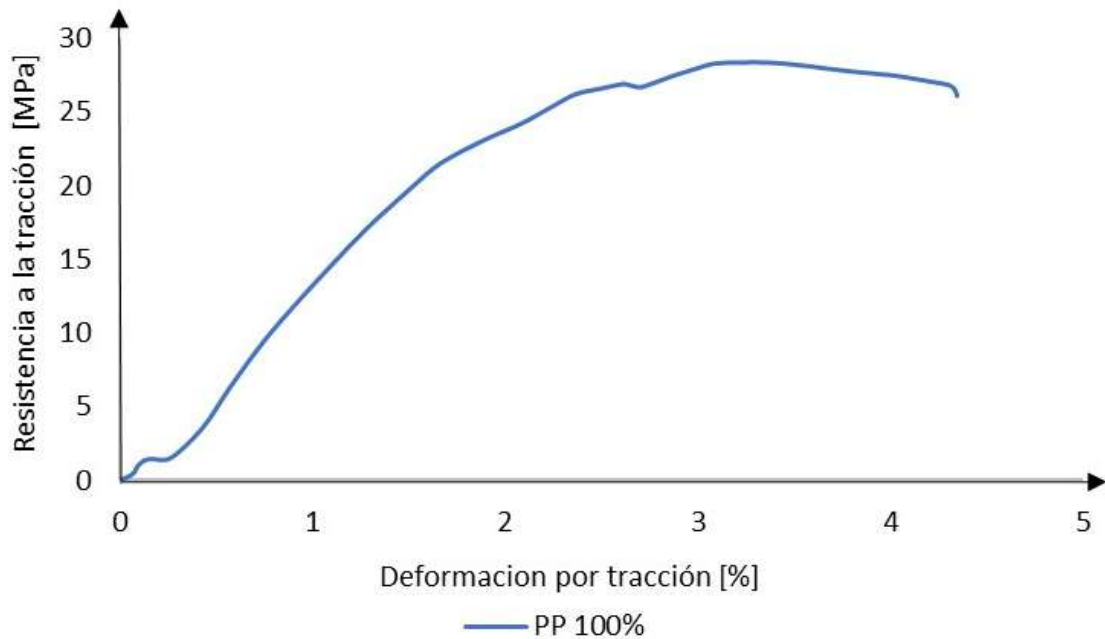


Figura 3.4. Curva resistencia a la tracción vs. deformación unitaria de 100%PP. (Fuente: Propia)



Figura 3.5. Condiciones finales de la probeta de 100%PP sometida a tracción. (Fuente: Propia)

3.4.2. Ensayo de flexión

Este ensayo se basó en la norma ASTM D790, en la cual señala que se debe realizar el ensayo al menos a 5 probetas, asegurando así una correcta realización del mismo.

En la Tabla 3.4 se indican los resultados (promedio) obtenidos después de la realización del ensayo de flexión de las probetas de 100%PP (polipropileno puro). Entre las propiedades obtenidas se muestra la resistencia a la flexión, deformación en el esfuerzo máximo. Cada propiedad con su respectivo coeficiente de variación menor de 30%, lo que significa un alto grado de repetitividad.

Tabla 3.4. Propiedades mecánicas del polipropileno obtenidas mediante el ensayo de flexión.

Composiciones	Resistencia a la flexión		Deformación en el esfuerzo máximo	
	[MPa]	C.V.	[%]	C.V.
100%PP	33,3	7,06	4,17	7,19

(Fuente: Propia)

La Figura 3.6 se muestra la curva de esfuerzo vs. deformación de las probetas 100%PP. La Figura 3.7 muestra el estado de una probeta de 100%PP después del ensayo. Se observa que la deformación es baja; su elongación final fue de 4,7%.

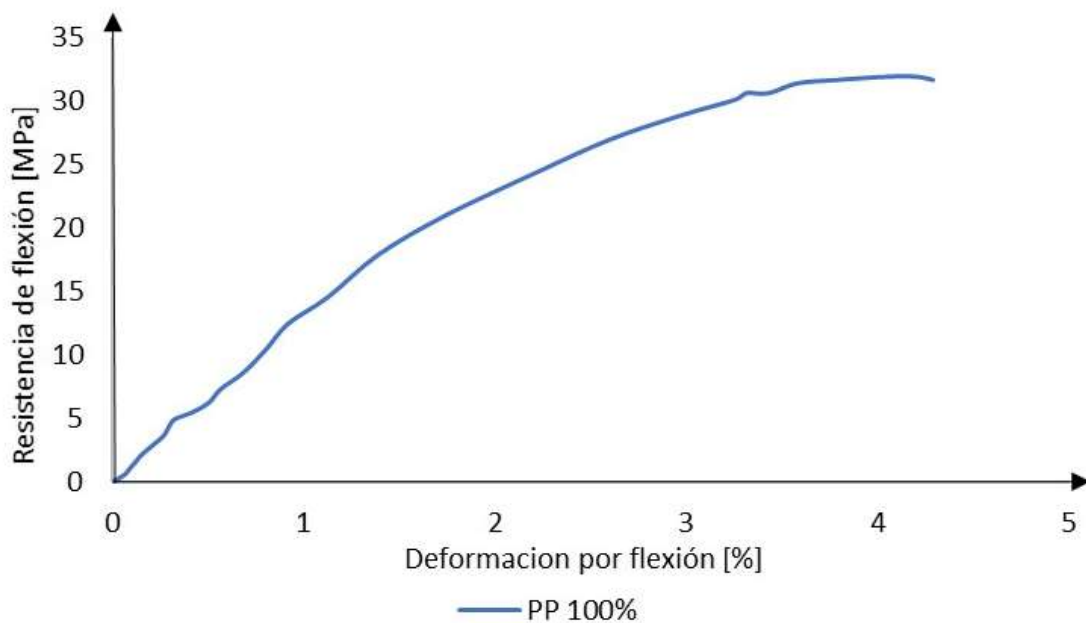


Figura 3.6. Curva resistencia a la flexión vs. deformación unitaria de 100%PP.
(Fuente: Propia)



Figura 3.7. Probeta de flexión según la norma ASTM D790.
(Fuente: Propia)

3.4.3. Ensayo de impacto

Este ensayo se realizó de acuerdo con la norma ASTM D256, en la cual señala que se debe ensayar al menos a 5 probetas, asegurando así una correcta realización del mismo.

En la Tabla 3.5 se indican los resultados (promedio) obtenidos después de la realización del ensayo de impacto de las probetas de 100%PP (polipropileno puro). Entre las propiedades obtenidas se muestra la energía de impacto, energía por unidad de longitud y resistencia al impacto. Cada una con sus respectivos coeficientes de variación, las cuales se observan que poseen un valor menor al 30%, lo que significa un alto grado de repetitividad.

Tabla 3.5. Resultado de ensayos de impacto de la matriz.

Composiciones	Energía de impacto		Energía / longitud		Resistencia al impacto	
	[MPa]	C.V.	(J/m)	C.V.	(kJ/m ²)	C.V.
100%PP	0,8668	15,6	137,99	14,76	10,20	14,33

(Fuente: Propia)

La Figura 3.8 muestra el estado de una probeta de 100%PP después del ensayo. Se observa que en todas las probetas se obtuvo una rotura completa de la misma.

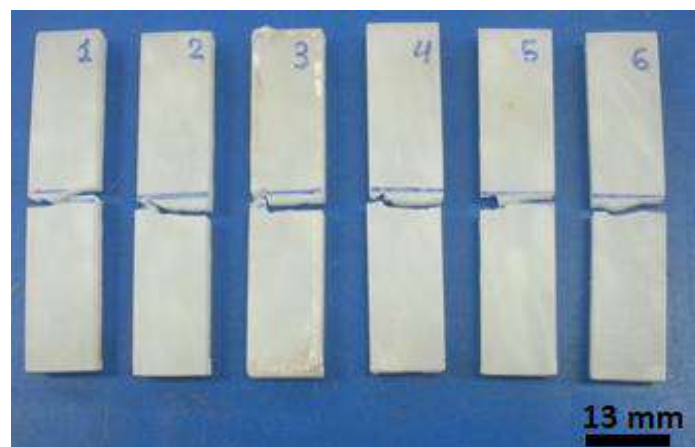


Figura 3.8. Condiciones finales de la probeta de 100%PP sometida al ensayo de impacto.
(Fuente: Propia)

3.5. Materiales Compuestos

3.5.1. Determinación de la densidad

En Tabla 3.6 se muestran las diferentes fracciones volumétricas para cada una de las diferentes composiciones con las cuales se encontró la densidad teórica empleando la ley de las mezclas, además de eso, se aprecia la densidad aparente y el error existente entre ambas.

Tabla 3.6. Densidad teórica y aparente de los materiales compuestos.

Composición	Fracciones Volumétricas				Densidad teórica	Densidad aparente	Error
	ϑ_{PP}	ϑ_{MAPP}	ϑ_{EN}	ϑ_{COMP}	g/cm ³	g/cm ³	%
5%-150 μ m	0,9653	0,0305	0,0042	1	0,9495	0,9253	2,6184
10%-150 μ m	0,9591	0,0320	0,0089	1	0,9976	0,9846	1,3243
15%-150 μ m	0,9522	0,0338	0,0141	1	1,0509	0,9912	6,0216
5%-250 μ m	0,9650	0,0305	0,0045	1	0,9492	0,9719	2,3324
10%-250 μ m	0,9584	0,0320	0,0095	1	0,9970	0,9537	4,5386
15%-250 μ m	0,9512	0,0337	0,0151	1	1,0498	0,9875	6,3086
5%-600 μ m	0,9646	0,0305	0,0049	1	0,9489	0,9368	1,2904
10%-600 μ m	0,9577	0,0320	0,0103	1	0,9962	0,9471	5,1871
15%-600 μ m	0,9501	0,0337	0,0163	1	1,0485	0,9928	5,6142

(Fuente: Propia)

Se observa en la tabla anterior que al aumentar el porcentaje de refuerzo en la composición aumenta la densidad teórica. Esto es debido a que la densidad del refuerzo es mucho mayor (Tabla 3.2) que las densidades de la matriz y compatibilizante (Tabla 2.1 y 2.3, respectivamente) por lo que se tiene una fracción volumétrica mayor para el refuerzo que a su vez aumenta la densidad teórica del material compuesto. Se puede apreciar la existencia de un error entre la densidad teórica y la densidad aparente en los diferentes materiales compuestos en algunos casos incluso mayor al 5%. Los diferentes materiales compuestos obtenidos presentaron porosidades, mismas que se encuentran presentes dentro de las muestras con las que se realizó el ensayo de densidad aparente (acápite 2.2.5.1), es decir, la masa medida no fue la que correspondía al volumen de las muestras debido a las porosidades, produciendo el error.

3.5.2. Índice de fluidez

Este ensayo se realizó de acuerdo con la norma ASTM D1238-13, en la cual señala que se debe realizar el ensayo al menos 5 cortes, asegurando así una correcta realización del mismo. En la Tabla 3.7 se listan los resultados (promedio \bar{x}) con su respectiva desviación estándar (σ) y varianza (σ^2) obtenidos después de la realización del ensayo de fluidez de los pellets de los diferentes materiales compuestos.

Tabla 3.7. Índice de fluidez de los materiales compuestos.

Composición	MFI [g/10min]	σ [g/10min]	σ^2
5%-150 μ m	3,822	1,22	1,487
10%-150 μ m	3,212	1,433	2,053
15%-150 μ m	3,814	0,984	0,966
5%-250 μ m	3,418	1,557	2,424
10%-250 μ m	3,606	1,109	1,231
15%-250 μ m	3,405	1,478	2,184
5%-600 μ m	2,844	0,798	0,637
10%-600 μ m	3,956	0,367	0,135
15%-600 μ m	3,984	0,128	0,016

(Fuente: Propia)

De acuerdo con el apartado 2.2.5.5 se sabe que después de someter un polímero a un proceso industrial (extrusión) este varía su índice de fluidez. Se considera una variación del 30% en dicho índice cuando el material no ha recibido un nivel de agresión exagerado y ha sido procesado correctamente [43].

Del Anexo 1 se tiene que el MFI del material virgen (100%PP) es de 3,3g/10min lo que significa un valor máximo de 4,29 g/10min para considerar correctamente procesado los materiales compuestos del presente estudio. Al observar los diferentes valores de índices de fluidez de la Tabla 3.7 se tiene que el menor valor obtenido fue de 2,844 g/10min para el material compuesto 15%-150 μ m, mientras que el máximo valor fue del material compuesto 5%-600 μ m con un índice de fluidez de 3,984g/10min. Ambos valores se encuentran dentro del rango esperado (ya explicado en el acápite 2.2.5.5.) lo que significa que los parámetros que implican temperatura y cizalla (perfil de temperaturas y velocidad de los husillos) durante el proceso de extrusión fueron correctos y no influyeron en las imperfecciones obtenidas durante el proceso de moldeo.

3.5.2.1. Efecto del tamaño de partícula

A continuación, se analizó el efecto que causa el tamaño de la partícula de refuerzo en el material compuesto manteniendo constante el porcentaje en peso del mismo.

En la Figura 3.9 se observan diagramas de barras que representan el valor del índice de fluidez para una composición con el 5% de refuerzo en peso y los diferentes tamaños de partículas. Cuando el refuerzo es de 250 μm se tiene el menor valor de índice de 3,212g/10min y para 150 μm el mayor de 3,822g/10min.

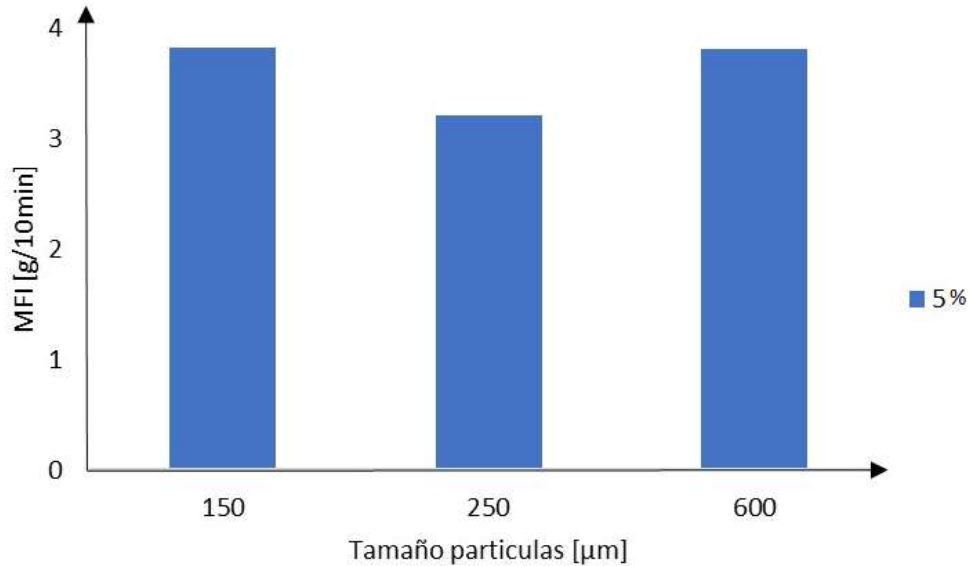


Figura 3.9. Efecto del tamaño de refuerzo en el índice de fluidez para 5% del mismo.
(Fuente: Propia)

En la Figura 3.10 se observan los valores del índice de fluidez para una composición con el 10% de refuerzo en peso y diferentes tamaños de partículas. Se observa una tendencia, al aumentar el tamaño del refuerzo también aumenta el índice de fluidez, para 150, 250 y 600 μm se tiene 3,418, 3,606 y 3,896g/10min respectivamente.

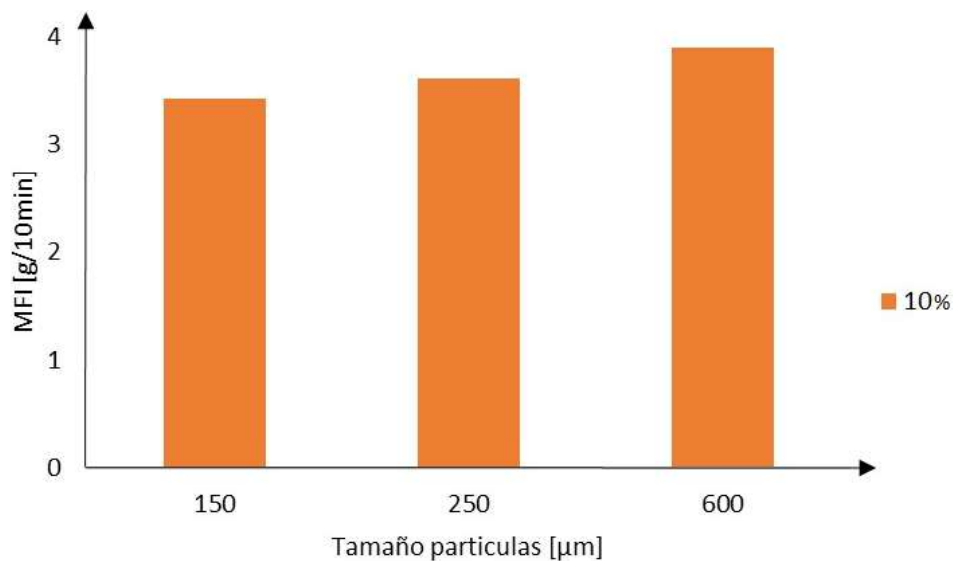


Figura 3.10. Efecto del tamaño de refuerzo en el índice de fluidez para 10% del mismo.
(Fuente: Propia)

Se observa en la Figura 3.11 los valores correspondientes del índice de fluidez para los 3 diferentes tamaños de partículas y una composición con el 15% de refuerzo en peso. Así mismo se observa la misma tendencia, al aumentar el tamaño del refuerzo también aumenta el índice de fluidez. Para 150, 250 y 600 μm se tiene 2,844, 3,956 y 3,984g/10min respectivamente.

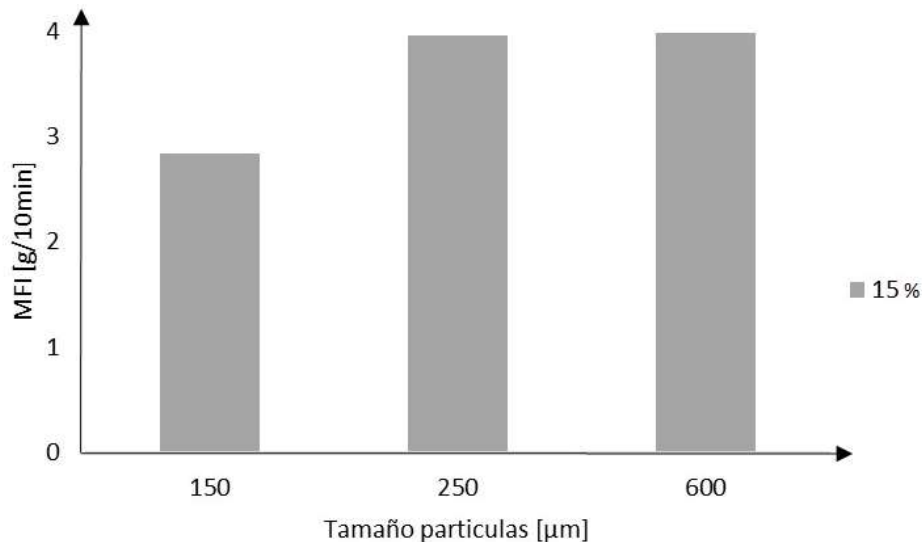


Figura 3.11. Efecto del tamaño de refuerzo en el índice de fluidez para 15% del mismo.
(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.8 se muestran los resultados del método de análisis de varianza (ANOVA) sobre el índice de fluidez para determinar la existencia o no de una influencia en el tamaño de partícula del refuerzo. El valor p es 0,26264, por lo que se acepta la hipótesis nula, es decir, no existe un efecto significativo del tamaño del refuerzo sobre el MFI.

Tabla 3.8. ANOVA del tamaño de partícula sobre el MFI.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Valor p	F crítico
Entre grupos	0,43496	2	0,21748	1,68456	0,26264	5,14325
Dentro de los grupos	0,77461	6	0,12910			
Total	1,20956	8				

(Fuente: Propia)

3.5.2.2. Efecto del porcentaje de refuerzo

A continuación, se analizó el efecto que causa el porcentaje de refuerzo en peso en el compuesto mientras se mantiene constante el tamaño del mismo.

En la Figura 3.12 se observan diagramas de barras que representan el valor del índice de fluidez para una composición con partículas de 150 μm y diferentes porcentajes en peso de refuerzo. Se observa la existencia de una relación inversa entre el porcentaje de refuerzo y el índice, a medida que se aumenta la cantidad de refuerzo el índice de fluidez disminuye. Se tiene 3,822, 3,418 y 2,844g/10min.

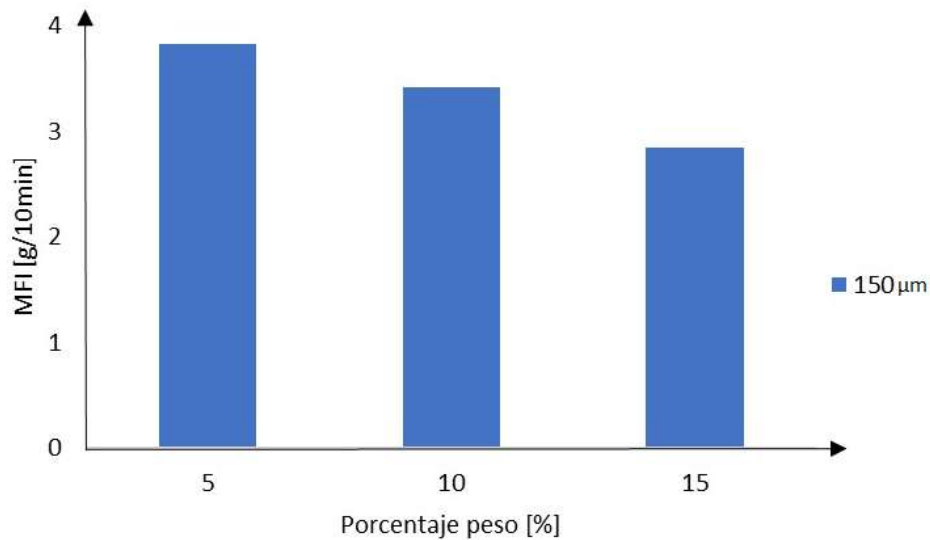


Figura 3.12. Efecto del porcentaje de refuerzo en el índice de fluidez para 150 μm .
(Fuente: Propia)

Como se aprecia en la Figura 3.13 para una composición con partículas de 250 μm de tamaño y para cantidades de 5%, 10% y 15% se observa la existencia de una relación directa entre el porcentaje de refuerzo y el índice, a medida que aumenta la cantidad de refuerzo el índice de fluidez también aumenta.

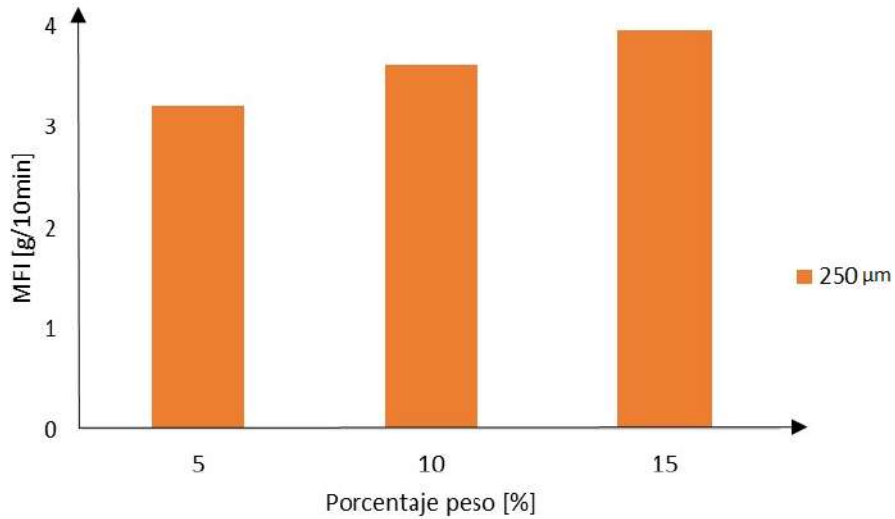


Figura 3.13. Efecto del porcentaje de refuerzo en el índice de fluidez para 250 μ m.
(Fuente: Propia)

Al observar la Figura 3.14 correspondiente a una composición con partículas de 600 μ m de tamaño y para cantidades de 5%, 10% y 15% se observa la existencia de una relación directa entre el porcentaje de refuerzo y el índice, a medida que se aumenta la cantidad de refuerzo el índice de fluidez aumenta ligeramente. Esta tendencia se debe al tamaño del refuerzo (la más grande del presente estudio), el cual causará una agresión mucho mayor al material durante el proceso de extrusión que los refuerzos de menor tamaño. Provocando una mayor pérdida de peso molecular al polímero y por lo tanto aumentando el índice de fluidez en mayor grado. Eso se verifica al observar las Figuras 3.9 3.10 y 3.11 donde para las 3 diferentes cantidades de refuerzo, 600 μ m tiene siempre el valor más alto de los 3.

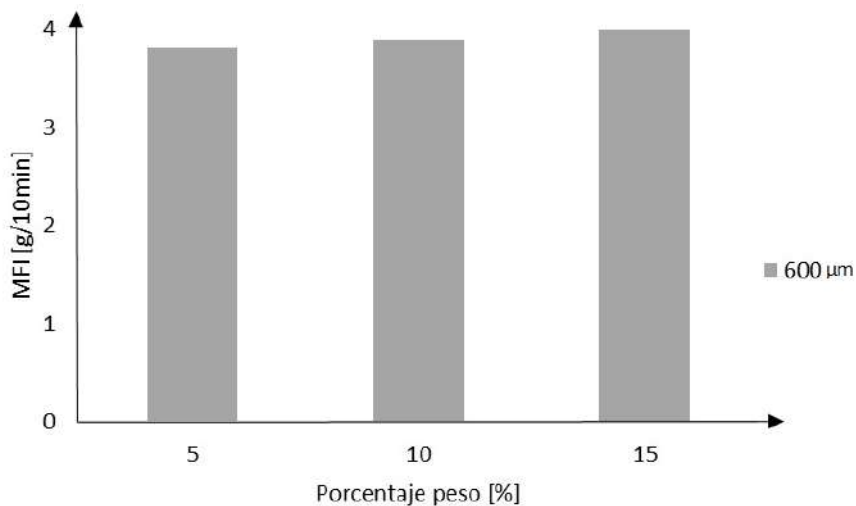


Figura 3.14. Efecto del porcentaje de refuerzo en el índice de fluidez para 600 μ m.
(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.9 se muestran los resultados del método de análisis de varianza (ANOVA) del porcentaje de refuerzo sobre el índice de fluidez, para determinar la existencia o no de un efecto significativo en el índice de fluidez al variar la cantidad de refuerzo. El valor p es 0,99263, por lo que se acepta la hipótesis nula, es decir, no existe un efecto significativo del porcentaje de refuerzo sobre el índice de fluidez.

Tabla 3.9. ANOVA del porcentaje de refuerzo sobre el MFI.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Valor p	F crítico
Entre grupos	0,00309	2	0,00154	0,00767	0,99236	5,14325
Dentro de los grupos	1,20647	6	0,20108			
Total	1,20956	8				

(Fuente: Propia)

3.5.3. Ensayo de tracción

Una vez realizados los ensayos de tracción según la norma ASTM D638-14 se obtuvieron los resultados promedios (\bar{x}) mostrados en la Tabla 3.10 de resistencia a la tracción, elongación en el punto de fluencia, resistencia a tracción en el punto de rotura, su elongación máxima y el módulo de elasticidad cada uno con su respectiva desviación estándar (σ). Valores con los cuales se puede construir las curvas de esfuerzo vs. deformación unitaria de los diferentes materiales compuestos, como se puede observar en la Figura 3.15.

Tabla 3.10. Propiedades de los materiales compuestos obtenidas después de someter las probetas al ensayo de tracción.

Composiciones	Resistencia a la tracción [MPa]		Elongación en el punto de fluencia [%]		Resistencia a la tracción en rotura [MPa]		Elongación máxima [%]		Módulo de elasticidad [MPa]	
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
5%-150μm	8,540	2,576	0,960	0,334	8,418	2,713	0,973	0,334	1222,333	154,689
10%-150μm	7,963	3,244	1,275	0,137	7,725	3,426	1,408	0,097	974,833	252,754
15%-150μm	11,298	1,745	1,271	0,212	10,255	1,951	1,308	0,228	1440	68,993
5%-250μm	7,152	2,595	1,268	0,240	6,308	2,367	1,415	0,200	873,167	217,788
10%-250μm	6,992	1,455	1,488	0,229	5,423	3,126	1,803	0,518	781	93,648
15%-250μm	7,685	2,914	1,328	0,310	6,244	4,045	1,800	0,504	928	168,384
5%-600μm	6,820	2,189	1,307	0,338	5,657	1,881	1,532	0,358	867,167	144,718
10%-600μm	10,650	0,984	1,555	0,175	8,502	3,158	2,005	0,417	1116,5	128,365
15%-600μm	14,993	1,277	1,902	0,268	14,283	1,342	2,022	0,316	1355	67,750

(Fuente: Propia)

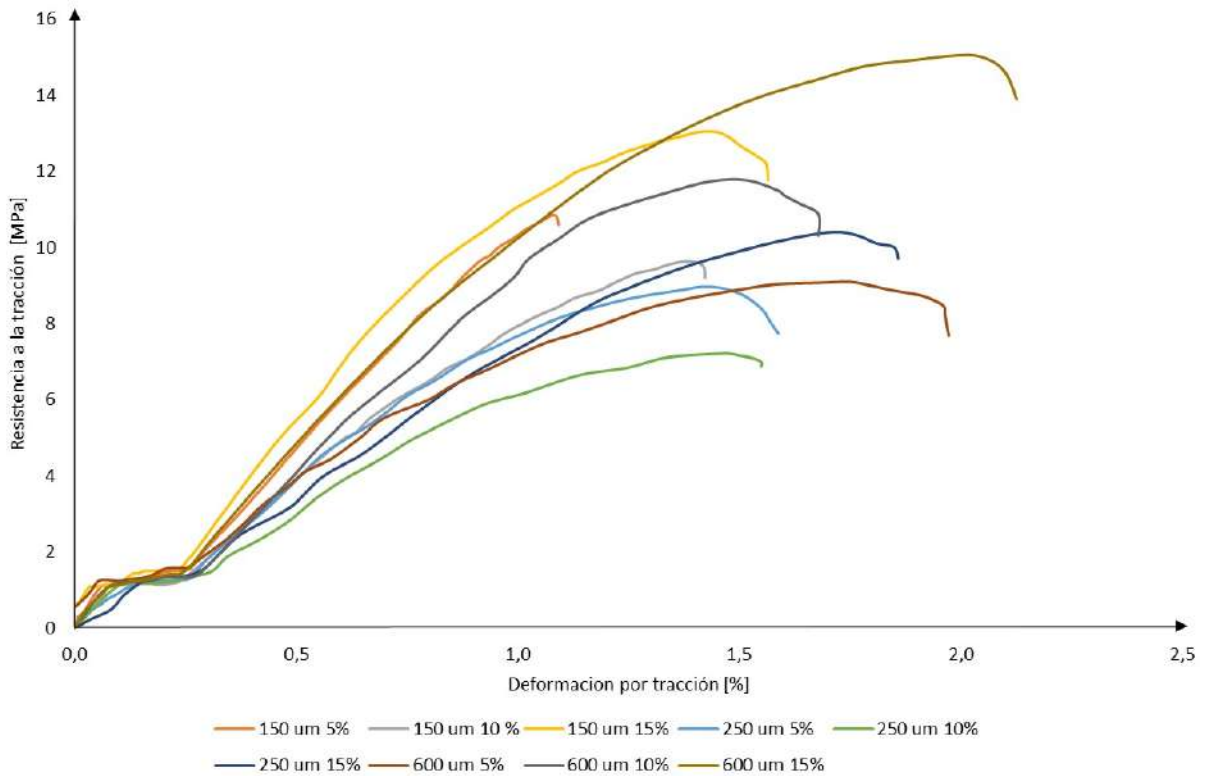


Figura 3.15. Curvas de la resistencia a la tracción vs. deformación unitaria de los materiales compuestos.
(Fuente: Propia)

De la Tabla 3.10 y Figura 3.15 se puede observar que en todos los materiales compuestos se produjo una disminución en sus propiedades, debido a las imperfecciones presentes en las probetas. Las imperfecciones más comunes fueron porosidades que se encontraban prácticamente en todos los tableros debido muy posiblemente a un incorrecto funcionamiento de la bomba de vacío durante la extrusión, porosidades que provocan un comportamiento frágil en las probetas a ensayar. El material compuesto 5%-600 μ m fue el que tuvo la reducción más drástica en su resistencia a la tracción con 6,820MPa lo cual representa una disminución del 73% en su propiedad. De igual forma el porcentaje de elongación se reduce un 51% en comparación con el material virgen de 2,7% baja a 1,3%. Hecho que era esperado al observar las porosidades presentes.

En la Figura 3.16 se ve como las probetas no presentan un cuello de botella en la zona de ruptura, característica de un comportamiento dúctil, en lugar de eso la fractura observada es de comportamiento frágil en los diferentes materiales compuestos.

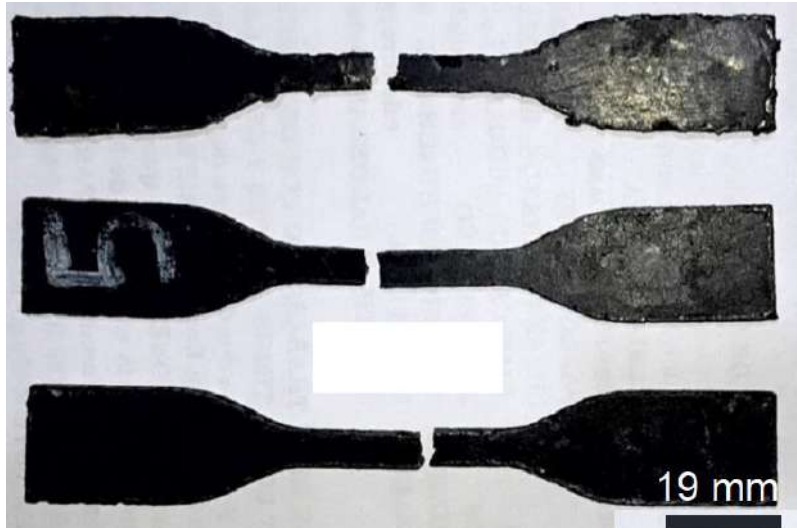


Figura 3.16. Condiciones finales de las probetas de los materiales compuestos sometidos a tracción.
(Fuente: Propia)

3.5.3.1. Efecto del tamaño de partícula

A continuación, se analizó el efecto que causa el tamaño de la partícula de refuerzo en el material compuesto al mantener constante el porcentaje en peso del mismo.

En las Figuras 3.17 y 3.18 se observan diagramas de barras que representan el valor de resistencia a la tracción y elongación respectivamente para una composición con el 5% de refuerzo en peso y diferentes tamaños de partículas. En las figuras se observa claramente una relación inversa entre el tamaño y la resistencia a la tracción. A medida que aumenta el tamaño de partícula la resistencia a la tracción disminuye. Mientras que para el porcentaje de elongación la relación es directa, a medida que aumenta el tamaño de partícula el porcentaje de elongación también aumenta, tal como se verifica en la Figura 3.18.

El material compuesto 5%-150 μ m presenta la mayor resistencia a la tracción con 8,5MPa y 0,96% de deformación, lo cual se traduce en una reducción del 67% y 64% en sus propiedades respectivamente. Mientras que el compuesto 5%-600 μ m alcanzó la mayor deformación con una reducción del 51% de su propiedad es decir 1,3072% de deformación y el menor valor de resistencia con una reducción de casi el 74% de la resistencia equivalente a 6,8MPa. Al analizar ambas gráficas al mismo tiempo se nota claramente que, cuando la resistencia a la tracción disminuye la deformación unitaria aumenta cuando se tiene 5% de refuerzo.

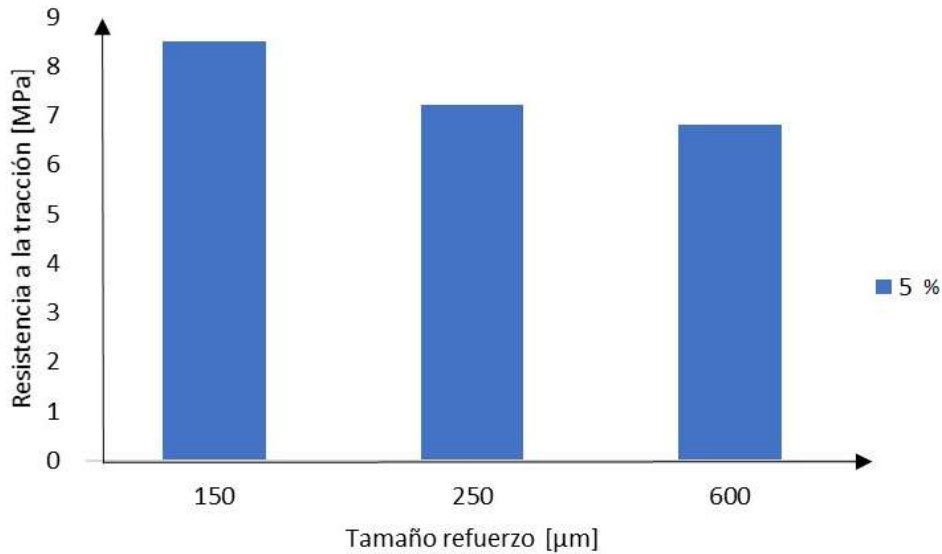


Figura 3.17. Efecto del tamaño de refuerzo en la resistencia a la tracción para 5% del mismo. (Fuente: Propia)

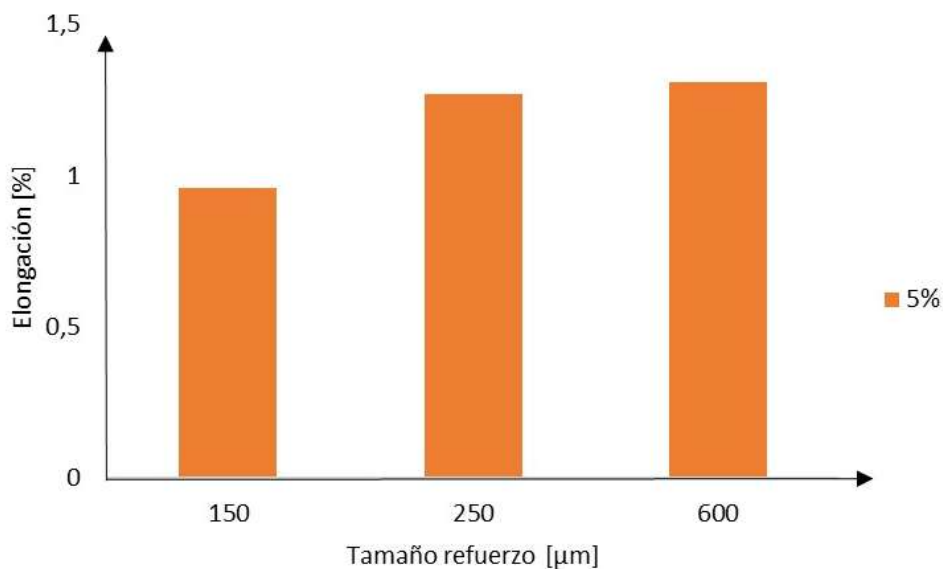


Figura 3.18. Efecto del tamaño de refuerzo en la elongación en el punto de ruptura para 5%. (Fuente: Propia)

En las Figuras 3.19 y 3.20 se observan diagramas de barras que representan los valores de resistencia a la tracción y elongación, respectivamente, para una composición con el 10% de refuerzo en peso y diferentes tamaños de partículas.

En la Figura 3.19 no se observa claramente una relación clara entre el tamaño y la resistencia a la tracción. Con la excepción del material compuesto 10%-250µm a medida que aumenta el tamaño de partícula la resistencia a la tracción también aumenta. Mientras que para el porcentaje de elongación la relación es directa, a medida que aumenta el tamaño de partícula el porcentaje de elongación también aumenta tal como se aprecia en la Figura 3.20.

El material compuesto 10%-600 μm presenta las mejores características tanto en resistencia a la tracción como en porcentaje de elongación. Posee una resistencia a la tracción de 10,7MPa y 1,555% de deformación unitaria, lo cual se traduce en una reducción del 59% y 42% en sus propiedades, respectivamente, al compararlas con la matriz. Mientras el material compuesto 10%-250 μm obtuvo la menor resistencia a la tracción con un valor de 7MPa, es decir, una reducción del 73%de su propiedad. El material compuesto 10%-250 μm alcanzó el menor porcentaje de elongación con un valor de 1,3% lo cual significa una reducción de aproximadamente el 51%. Al analizar las gráficas juntas se nota que cuando el tamaño del refuerzo aumenta también aumentará la resistencia a la tracción y a su vez de igual manera la elongación cuando se tiene un bicompuesto con un refuerzo del 10%

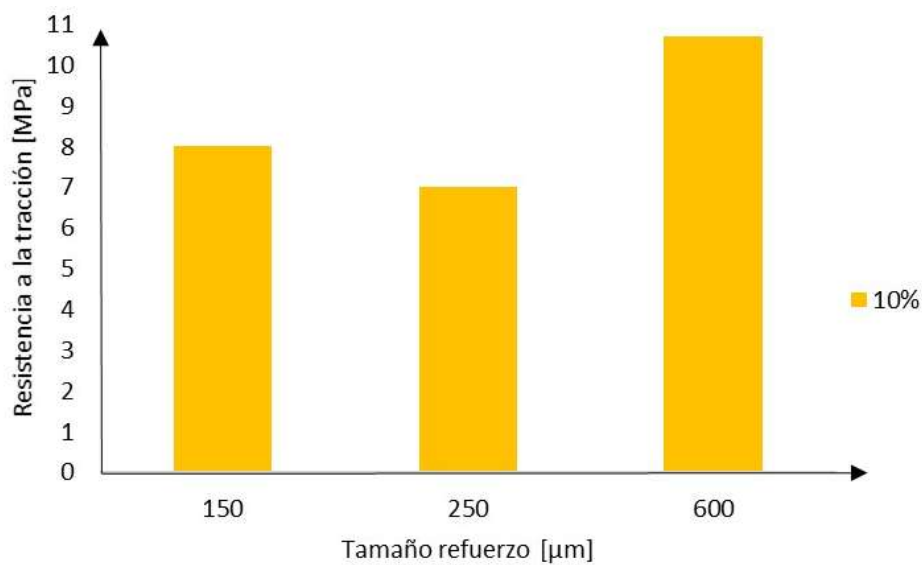


Figura 3.19. Efecto del tamaño de refuerzo en la resistencia a la tracción para 10% del mismo. (Fuente: Propia)

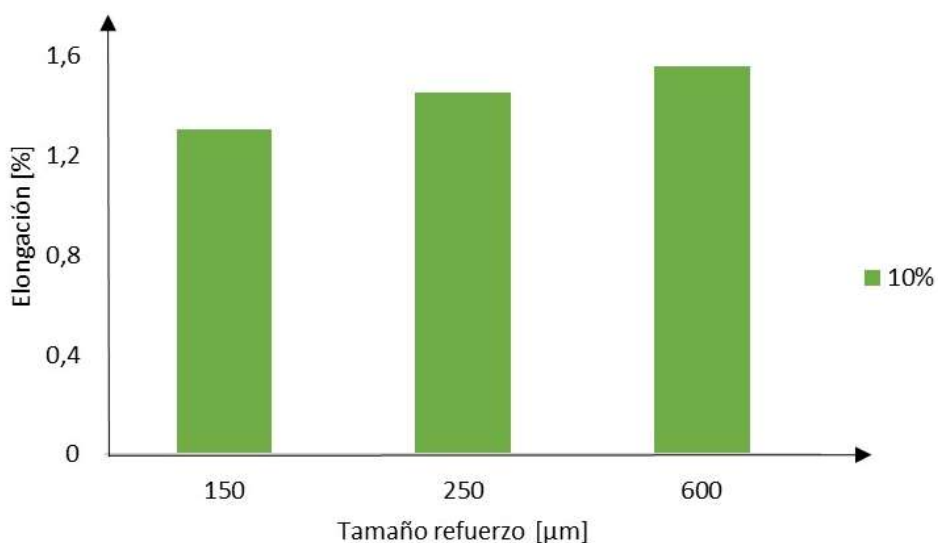


Figura 3.20. Efecto del tamaño de refuerzo en la elongación en el punto de ruptura para 10%. (Fuente: Propia)

En las Figuras 3.21 y 3.22 se observan los valores de resistencia a la tracción y elongación, respectivamente, para una composición con el 10% de refuerzo en peso y diferentes tamaños de partículas.

Con la excepción del material compuesto 15%-250 μm a medida que aumenta el tamaño de partícula la resistencia a la tracción también aumenta. Mientras que para el porcentaje de elongación la relación es directa, a medida que aumenta el tamaño de partícula el porcentaje de elongación también aumenta tal y como se observa en la Figura 3.22.

El material compuesto 15%-600 μm presenta las mejores características tanto en resistencia a la tracción como en porcentaje de elongación. Posee una resistencia a la tracción de 14,9MPa y 1,902% de deformación unitaria, lo cual se traduce en una reducción del 42% y 30% en sus propiedades, respectivamente, al compararlas con la matriz. Siendo este el material compuesto con mejores características en el presente estudio. Mientras que el material compuesto 15%-250 μm obtuvo la menor resistencia a la tracción con un valor de 7,7MPa, es decir, una reducción del 70% de su propiedad. El material compuesto 15%-150 μm alcanzó el menor porcentaje de elongación con un valor de 1,2% lo cual significa una reducción de aproximadamente el 55%. Al igual que el caso anterior al analizar las gráficas juntas se nota que cuando el tamaño del refuerzo aumenta también aumentará la resistencia a la tracción y a su vez de igual manera la elongación cuando se tiene un bicompuesto con un refuerzo del 15%

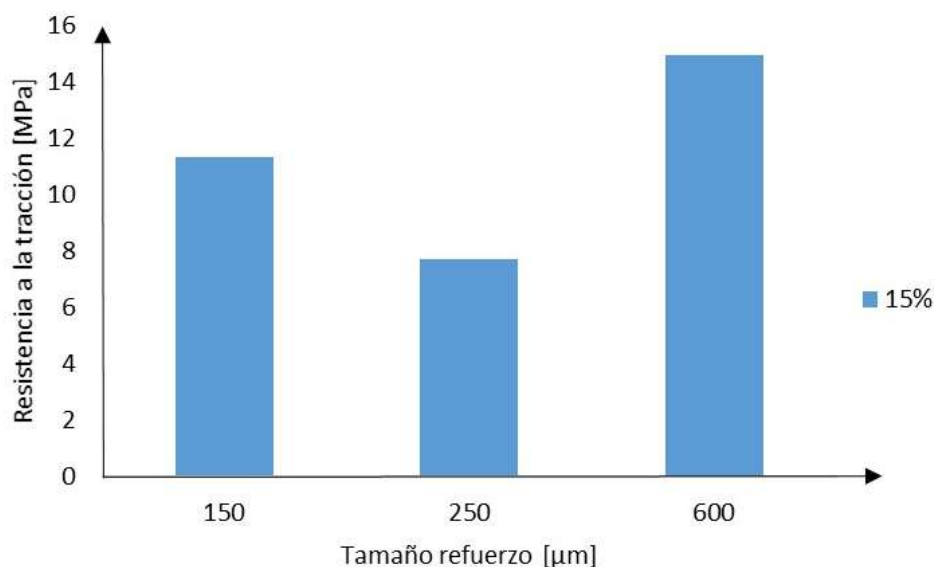


Figura 3.21. Efecto del tamaño de refuerzo en la resistencia a la tracción para 15% del mismo.
(Fuente: Propia)

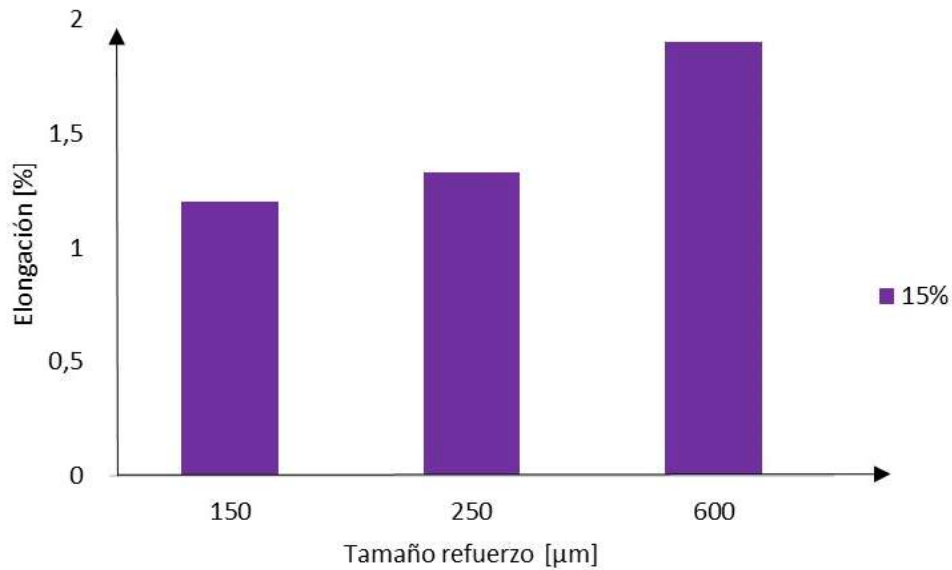


Figura 3.22. Efecto del tamaño refuerzo en la elongación en el punto de ruptura para 15%.
(Fuente: Propia)

De las Figuras 3.17, 3.19 y 3.21 se observa que las composiciones con 10% y 15% de refuerzo al aumentar el tamaño aumenta también la resistencia a tracción, mientras con 5% de porcentaje en peso de refuerzo al aumentar el tamaño de partícula la resistencia a tracción disminuye, lo cual concuerda con los estudio de Cárdenas A. (2012) [45] y Lázaro, Karen *et al.* (2016) [46].

En la Tabla 3.11 muestran los resultados del método de análisis de varianza (ANOVA) del tamaño de partícula sobre la resistencia a tracción, para determinar la existencia o no de una influencia significativa al variar el tamaño de partícula del refuerzo. El valor p es 0,31593, por lo que se acepta la hipótesis nula, es decir, no existen efectos significativos en la resistencia a tracción al aumentar el tamaño de refuerzo.

Tabla 3.11. ANOVA del tamaño de partícula sobre la resistencia a tracción.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Valor p	F crítico
Entre grupos	18,57986	2	9,28993	1,40480	0,31593	5,14325
Dentro de los grupos	39,67799	6	6,61300			
Total	58,25786	8				

(Fuente: Propia)

3.5.3.2. Efecto del porcentaje de refuerzo

En las Figuras 3.23 y 3.24 se observan diagramas de barras que representan el valor de resistencia a la tracción y elongación, respectivamente, para una composición con diferentes porcentajes de refuerzo mientras se mantiene constante el tamaño de partícula ($150\mu\text{m}$).

Con la excepción del material compuesto 10%- $150\mu\text{m}$ en la Figura 3.23 se observa que a medida que aumenta el porcentaje de refuerzo la resistencia a la tracción también aumenta. Mientras que en la Figura 3.24 se observa que para el porcentaje de elongación no se observa una relación entre el porcentaje de refuerzo y la elongación, ya que para un 10% de refuerzo se obtiene una elongación con un valor de 1,408% mientras que para 15% de refuerzo la elongación vuelve a disminuir hasta 1,308%.

El material compuesto 15%- $150\mu\text{m}$ presenta la mayor resistencia a la tracción con 11,3MPa y a su vez 1,308% de formación, lo cual se traduce en una reducción del 56% y 51% en sus propiedades, respectivamente, mientras que el material compuesto 10%- $150\mu\text{m}$ alcanzó la mayor deformación con una reducción del 47% de su propiedad, es decir, 1,408% de deformación y a su vez el menor valor de resistencia con una reducción de casi el 70% de la resistencia equivalente a 8MPa. El material compuesto 5%- $15\mu\text{m}$ obtuvo la menor elongación con tan solo 0,973 lo cual significa una reducción del 74%.

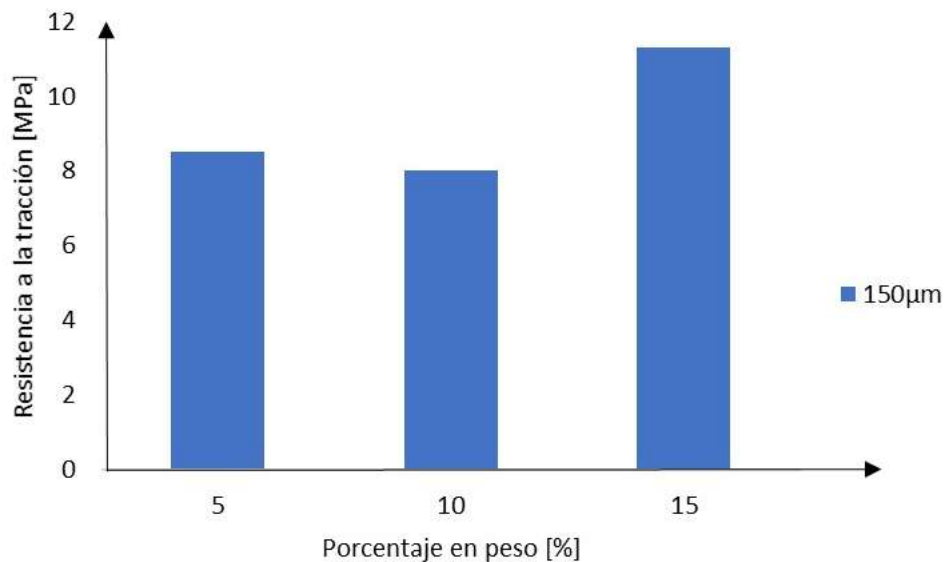


Figura 3.23. Efecto del porcentaje de refuerzo en la resistencia a la tracción para $150\mu\text{m}$.
(Fuente: Propia)

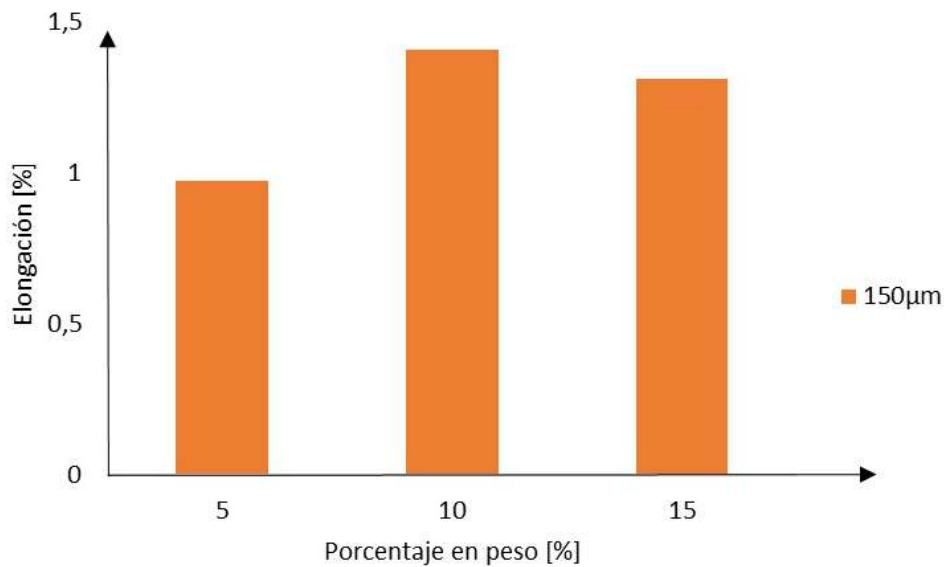


Figura 3.24. Efecto del porcentaje de refuerzo en la elongación en el punto de ruptura para un tamaño de 150µm.
(Fuente: Propia)

En las Figuras 3.25 y 3.26 se observan diagramas de barras que representan los valores de resistencia a la tracción y elongación respectivamente para una composición con diferentes porcentajes de refuerzo mientras se mantiene constante el tamaño de partícula (250µm).

En la Figura 3.25 se observa una relación entre el porcentaje y la resistencia a la tracción. A medida que aumenta el porcentaje de refuerzo la resistencia a la tracción también aumenta. De igual manera en la Figura 3.26 se aprecia que a medida que aumenta el porcentaje de refuerzo también aumenta la elongación.

El material compuesto 15%-250µm presenta la mayor resistencia a la tracción con 7,7MPa y alcanza 1,8% de formación, lo cual se traduce en una reducción del 70% y 33,3% en sus propiedades, respectivamente, mientras que el material compuesto 10%-250µm alcanzó la mayor elongación con una reducción del 33,2% de su propiedad es decir 1,803% de deformación y el menor valor de resistencia con una reducción de casi el 73% de la resistencia equivalente a 7MPa. Al analizar las Figuras 3.25 y 3.26 al mismo tiempo se nota claramente que al aumentar el porcentaje en peso del refuerzo la resistencia a la tracción aumenta y de igual forma su elongación.

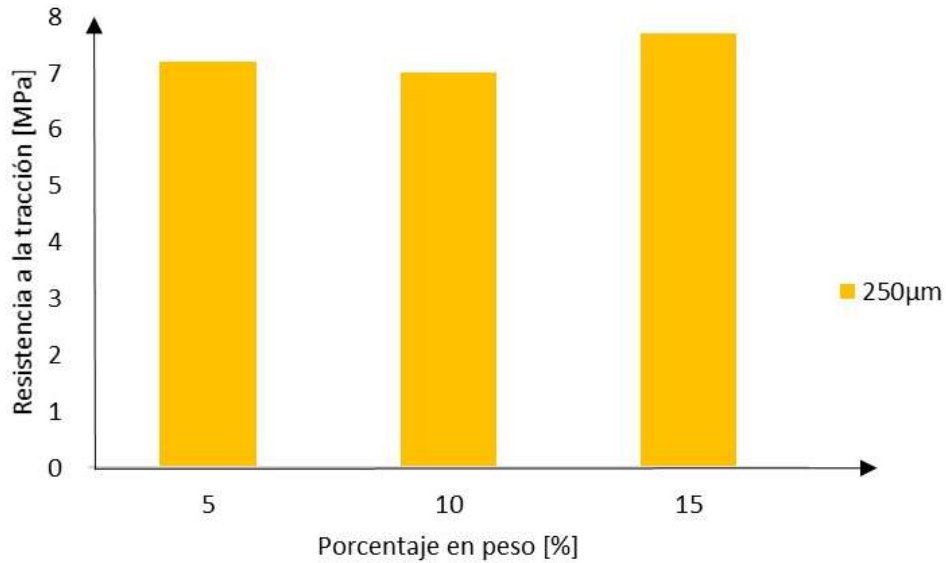


Figura 3.25. Efecto del porcentaje de refuerzo en la resistencia a la tracción para 250µm.
(Fuente: Propia)

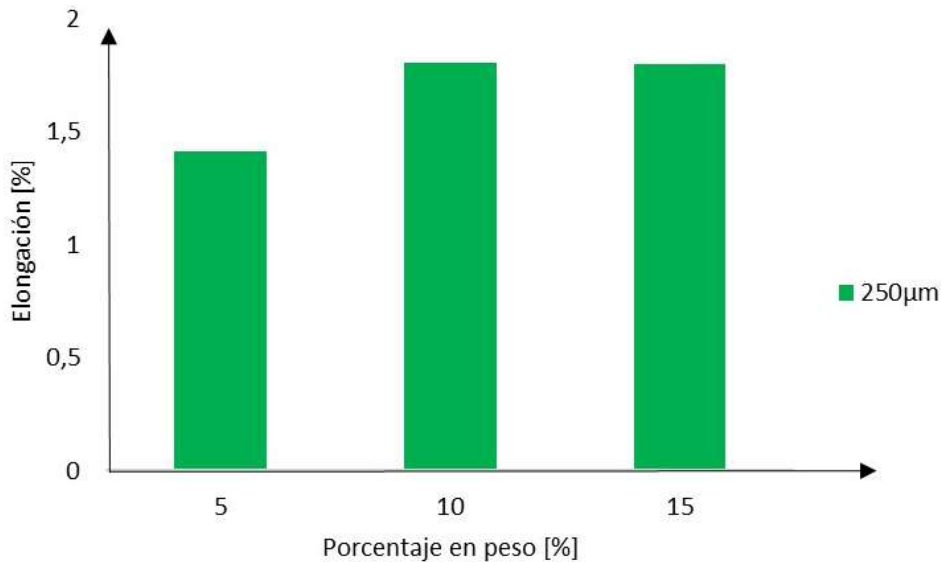


Figura 3.26. Efecto del porcentaje de refuerzo en la elongación en el punto de ruptura para un tamaño de 250µm.
(Fuente: Propia)

En las Figuras 3.27 y 3.28 se observan los valores de resistencia a la tracción y elongación para una composición con diferentes porcentajes de refuerzo mientras se mantiene constante el tamaño de partícula (250µm).

Se observa en la Figura 3.27 una relación entre el porcentaje y la resistencia a la tracción, a medida que aumenta el porcentaje de refuerzo la resistencia a la tracción también aumenta. En el porcentaje de elongación la relación es igual, a medida que aumenta el porcentaje de refuerzo la elongación también aumenta.

Mientras que el material compuesto con mayor resistencia a la tracción fue 15%-600 μ m el cual presentó un valor de 14,9MPa lo cual quiere decir una disminución del 42% en dicha propiedad. A su vez se obtuvo un valor cercano al porcentaje de elongación en el punto de fluencia del material virgen el cual fue de 2,7% mientras que dicho compuesto tuvo una elongación de 1,902 el cual corresponde a una disminución del 30%. Mientras que el material compuesto 5%-600 μ m obtuvo la menor resistencia a la tracción con un valor de 6,8MPa, es decir, una reducción del 73% de su propiedad. De igual manera obtuvo el menor porcentaje de elongación con un valor de 1,307% lo cual significa una reducción de aproximadamente el 51%. Al analizar las gráficas juntas se nota que cuando el porcentaje de refuerzo aumenta también aumentará la resistencia a la tracción tal y como Sapuan y Harimi (2003) [19] expresan en su investigación y a su vez, de igual manera con la elongación, cuando se tiene un bicompuesto con un tamaño de 600 μ m.

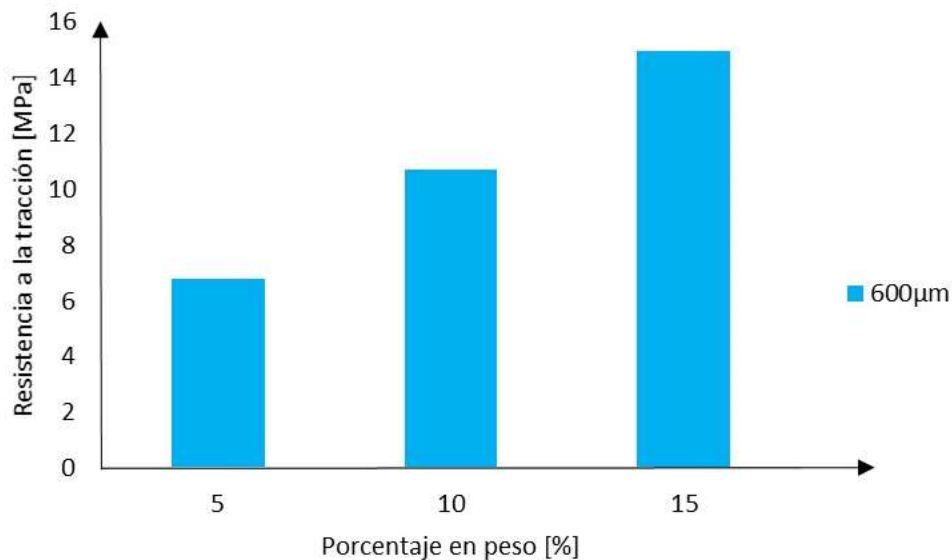


Figura 3.27. Efecto del porcentaje de refuerzo en la resistencia a la tracción para 600 μ m.
(Fuente: Propia)

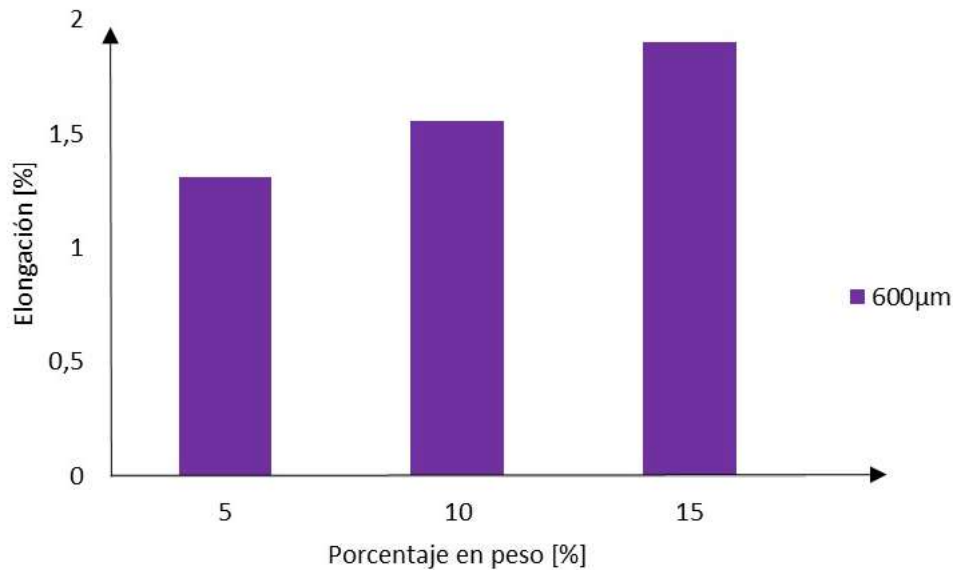


Figura 3.28. Efecto del porcentaje de refuerzo en la elongación en el punto de ruptura para un tamaño de 600µm.
(Fuente: Propia)

De las Figuras 3.23, 3.25 y 3.27 se observa que al aumentar el porcentaje en peso del refuerzo aumenta la resistencia a tracción. Estudios realizados por R. Malkapuram, V. Kumar y Y. Singh Neg (2009) [47] y Lázaro Karen *et al.* (2016) [46] nos ratifica que la resistencia a la tracción es directamente proporcional con el aumento en porcentaje en peso de la cantidad refuerzo. Esto se debe a que las partículas aportan rigidez al material compuesto.

En la Tabla 3.12 se muestran los resultados del método de análisis de varianza (ANOVA) del porcentaje en peso sobre la resistencia a tracción, para determinar la existencia o no de una influencia significativa en la resistencia a la tracción al variar la cantidad de refuerzo. El valor p es 0,21805, por lo que se acepta la hipótesis nula, es decir, a pesar de que existen efectos al aumentar la cantidad de refuerzo (al aumentar el porcentaje de refuerzo aumentó la resistencia a tracción) dichos efectos no son significativos en la resistencia a tracción.

Tabla 3.12. ANOVA del porcentaje en peso de refuerzo sobre la resistencia a tracción.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Valor p	F crítico
Entre grupos	23,19286	2	11,59643	1,98428	0,21805	5,14325
Dentro de los grupos	35,06499	6	5,844165			
Total	58,25786	8				

(Fuente: Propia)

3.5.3.3. Comparación del material compuesto con la matriz

En la Tabla 3.13 se muestran propiedades como resistencia a la tracción, elongación en el punto de fluencia, resistencia a la tracción en rotura, elongación máxima y módulo de elasticidad del material virgen y del material compuesto que obtuvo las menores reducciones en sus propiedades mecánicas.

Tabla 3.13. Resumen de propiedades de 100%PP y el material compuesto con las mejores características.

Composiciones	Resistencia a la tracción [MPa]		Elongación en el punto de fluencia [%]		Resistencia a la tracción en rotura [MPa]		Elongación máxima [%]		Módulo de elasticidad [MPa]	
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
100%PP	26,1	1,35	2,7	0,75	25,5	0,91	4,7	1,66	1582,9	149,97
15%-600μm	14,9	1,27	1,902	0,27	14,283	1,342	2,02	0,316	1355	67,75

(Fuente: Propia)

Con los valores obtenidos de la tabla anterior se tiene curvas de esfuerzo vs. deformación unitaria tanto del polipropileno puro y del material compuesto en una misma gráfica como se observa en la Figura 3.29.

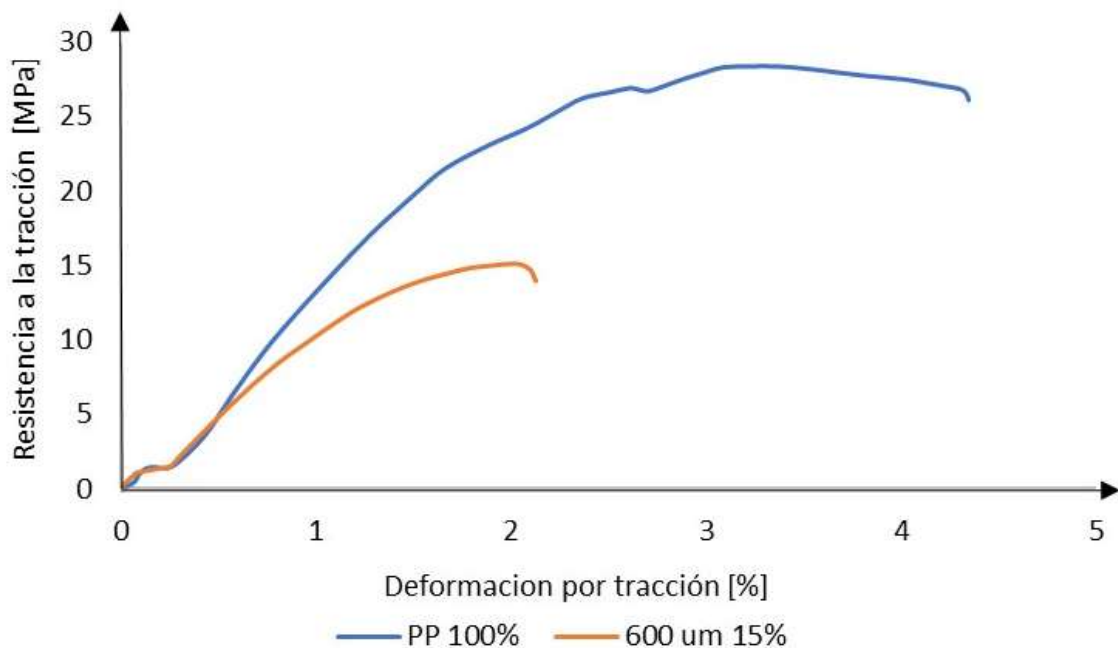


Figura 3.29. Curva de la resistencia a la tracción vs. deformación del polipropileno con el material compuesto con las mejores características.

(Fuente: Propia)

Los resultados obtenidos después de evaluar las probetas del material compuesto en sus diferentes composiciones fueron inferiores a los resultados del 100%PP. Este puede ser causado por una mala desgasificación, la irregularidad de la geometría refuerzo según Liu H. et al. (2008) [48], la aglomeración de las partículas o por baja interacción entre la matriz y el refuerzo (a pesar del uso del compatibilizante) de acuerdo a Idrus, M. et al. (2011) [49] . Motivos por las cuales se produce la fractura más rápido [46].

3.5.3.4. Análisis de la fractura

Todos los especímenes sometidos al ensayo de tracción tienen una fractura frágil, esto se debe a que la matriz tiene un bajo porcentaje de ductilidad (posee un porcentaje de elongación del 7%), de igual manera se debe a las porosidades e imperfecciones, siendo estos concentradores de esfuerzos. Es decir, las probetas actúan de una forma frágil debido a su estructura interna. La mayoría de las fracturas obtenidas son rectas con una deformación mínima de las mismas. En la Figura 3.30 se observa las fracturas obtenida de las probetas ensayadas a tracción.

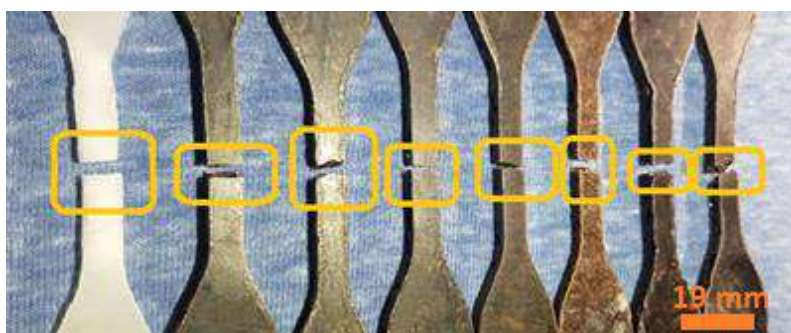


Figura 3.30. Falla recurrente en el ensayo de tracción.
(Fuente: Propia)

Al realizar una inspección visual en la zona transversal de la fractura, una vez realizado el ensayo de tracción, se observan las porosidades e imperfecciones como se muestra en la Figura 3.31. Estas son concentradores de esfuerzo provocando que la falla sea frágil.



Figura 3.31. Sección transversal de cada composición de material compuesto ensayado a tracción.
(Fuente: propia)

En la Figura 3.31 se presentan una probeta de cada material compuesto sometido a tracción, en cual se observa que cada probeta tiene zonas porosas o zonas huecas, él mismo fue ampliado en la Figura 3.32.



Figura 3.32. Sección transversal probeta sometida a tracción
(Fuente: Propia)

El material compuesto que menos reducción de propiedades a tracción presentó, fue la composición 15%-600 μ m, misma que de igual manera contiene porosidades en su estructura interna. Al comparar una probeta del material compuesto con una probeta de 100%PP como se muestra en la Figura 3.53 se observa que las porosidades son pocas, pero existen en el material compuesto y casi nulas en 100%PP.

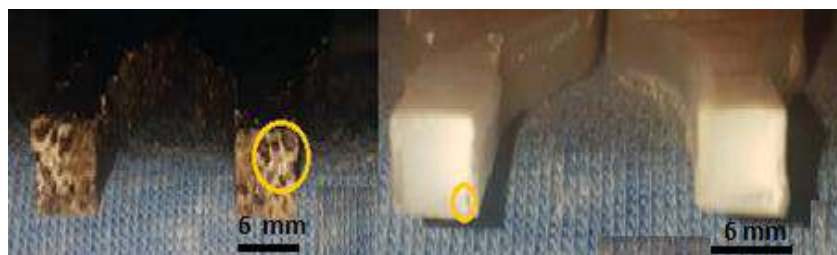


Figura 3.33. Sección transversal de probetas sometidas a tracción, a) Material compuesto 15%-600 μ m, b) 100%PP.
(Fuente: Propia)

En base al análisis realizado, se evidencia que el material compuesto con más porosidades e imperfecciones, tienden a fracturarse con mayor facilidad, soportando menos esfuerzos hasta llegar a la rotura completa del material compuesto, la formación de las porosidades fue explicado ampliamente en el acápite 3.2.

3.5.4. Ensayo de flexión

Una vez realizados los ensayos de flexión según la norma ASTM D790-17 se obtuvieron los resultados promedios (\bar{x}) mostrados en la Tabla 3.14 de resistencia a la flexión, deformación en el esfuerzo máximo cada uno con su desviación estándar respectiva (σ). Valores con los cuales se puede construir las curvas de esfuerzo vs. deformación unitaria de los diferentes materiales compuestos, cómo se lo puede observar en la Figura 3.34.

Tabla 3.14. Propiedades de los materiales compuestos obtenidas después de someter las probetas al ensayo de flexión.

Composiciones	Resistencia a la flexión [MPa]		Deformación en el punto máximo [%]	
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
5%-150μm	12,08	3,078	3,503	0,615
5%-200μm	24,33	4,196	3,018	0,542
5%-600μm	21,30	8,034	3,185	0,467
10%-150μm	21,35	0,342	3,250	0,192
10%-200μm	31	5,078	3,368	0,430
10%-600μm	11,78	2,419	2,448	0,428
15%-150μm	16,72	3,785	3,520	0,462
15%-200μm	18,40	7,890	2,245	0,721
15%-600μm	16,28	1,232	3,578	0,428

(Fuente: Propia)

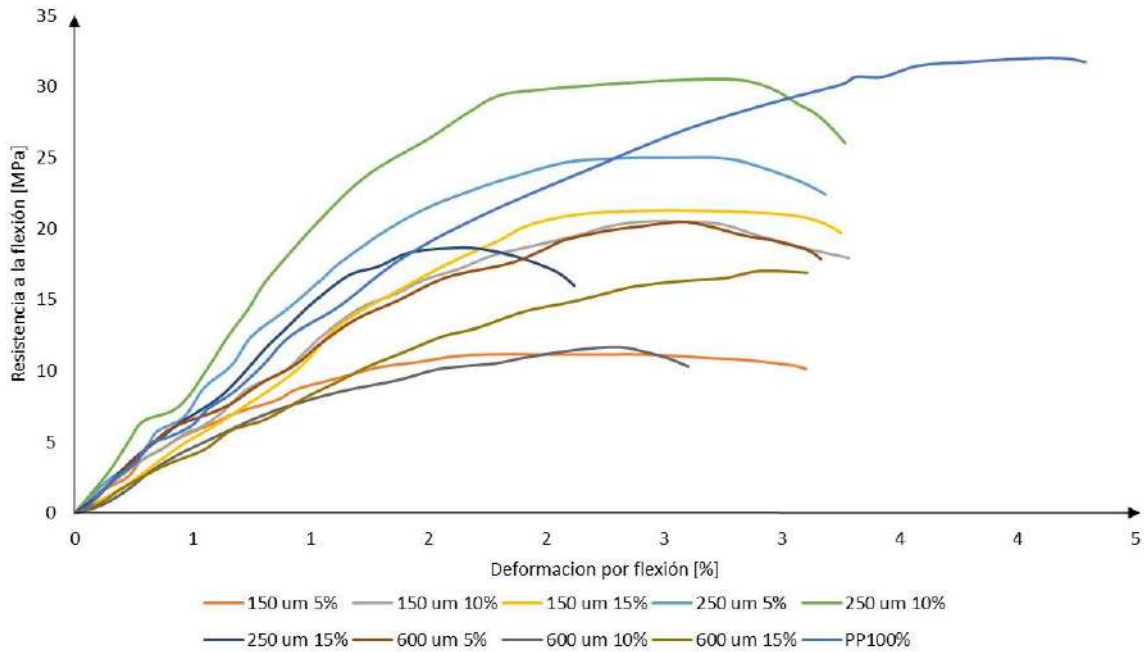


Figura 3.34. Curvas de la resistencia a la flexión vs. deformación unitaria de los diferentes materiales compuestos.
(Fuente: Propia)

De la Tabla 3.14 y Figura 3.34 se puede observar que en todos los materiales compuestos se produjo una disminución en sus propiedades mecánicas debido a la presencia de porosidad.

El material compuesto 10%-600 μ m fue el que tuvo la reducción más drástica en su resistencia a la flexión de 33,3MPa a 11,78MPa lo cual representa una disminución del 64,6% en su propiedad, de igual forma su porcentaje de elongación se reduce un 41,3% en comparación con el material virgen de 4,17% baja a 2,48%.

En la Figura 3.35 se ve el lugar ruptura de las probetas después de ser sometidas al ensayo de flexión.



Figura 3.35. Condiciones finales de la probeta de los materiales compuestos sometidos a flexión.
(Fuente: Propia)

3.5.4.1. Efecto del tamaño de partícula

A continuación, se analizó el efecto que causa el tamaño de la partícula de refuerzo en el material compuesto durante el ensayo de flexión manteniendo constante el porcentaje en peso del mismo.

En la Figura 3.36 se observan diagramas de barras que representan el valor de resistencia a la flexión para una composición con el 5% de refuerzo en peso y diferentes tamaños de partículas. Se obtuvo un valor de 12,08MPa con 150 μ m mientras que con las cuando las partículas de mayor tamaño ese valor prácticamente se duplica 24,33MPa y 21,30MPa para 200 y 600 μ m, respectivamente. Aun así, siguen siendo valores relativamente bajos al ser comparados con el material puro, ya que estos materiales compuestos presentan una reducción del 63%, 27%, y 36% en la resistencia a flexión para cada uno de los 3 tamaños.

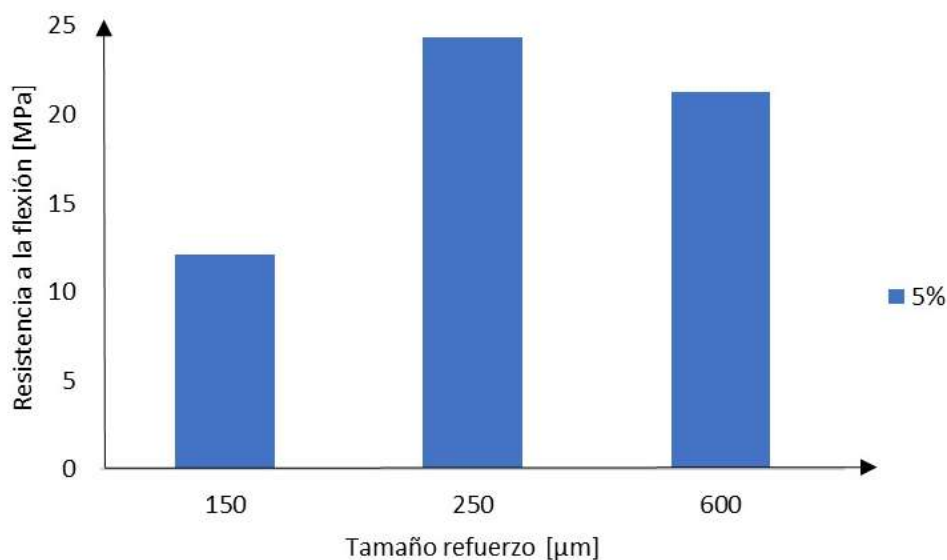


Figura 3.36. Efecto del tamaño de refuerzo en la resistencia a la flexión para 5% del mismo.
(Fuente: Propia)

En la Figura 3.37 se observan los valores de resistencia a la flexión para una composición con el 10% de refuerzo en peso y diferentes tamaños de partículas. Se aprecia que para un tamaño de 150 μ m posee una resistencia a la flexión de 21,35MPa al aumentar el tamaño a 250 μ m la resistencia a flexión aumenta hasta 31MPa, pero al aumentar aún más el tamaño hasta 600 μ m la resistencia a flexión disminuye de manera drástica hasta 11,78MPa. El material compuesto 10%-150 μ m sufrió una reducción del 35% de su resistencia mientras que el material compuesto 10%-250 μ m tuvo una disminución únicamente del 6% a su vez que el material compuesto 10%-600 μ m una reducción del 64% al compararlo con la resistencia a flexión de la matriz.

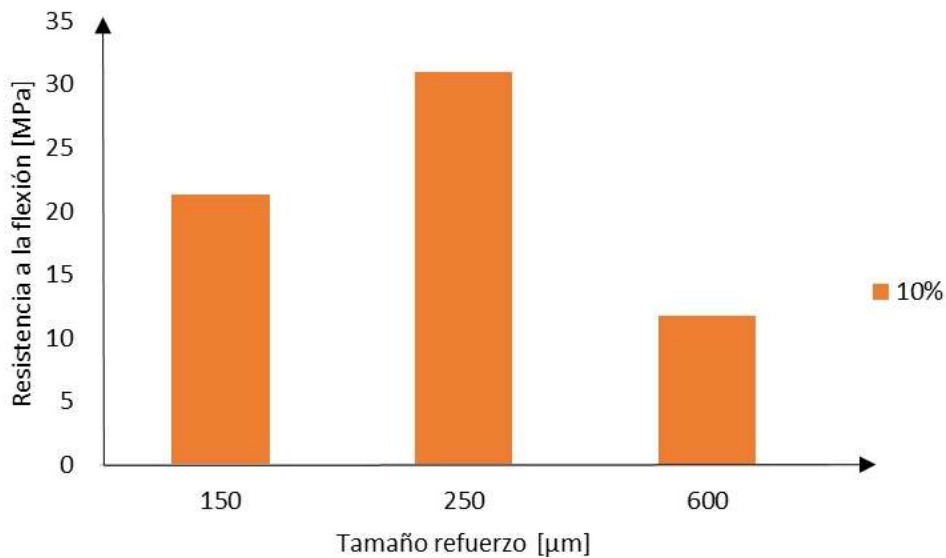


Figura 3.37. Efecto del tamaño de refuerzo en la resistencia a la flexión para 10% del mismo.
(Fuente: Propia)

Se observa en la Figura 3.38 los valores de resistencia a la flexión para una composición con el 15% de refuerzo en peso y diferentes tamaños de partículas. Para un tamaño de 150µm posee una resistencia a la flexión de 16,72MPa al aumentar el tamaño a 250µm la resistencia a flexión aumenta nuevamente (tal y como se observó en los casos anteriores), hasta un valor 18,40MPa en este caso y de igual forma al aumentar aún más el tamaño hasta 600µm la resistencia a flexión disminuye de manera drástica hasta 16,28MPa como en los casos anteriores (5 y 10%). El material compuesto 15%-150µm sufrió una reducción de prácticamente el 50% de su resistencia mientras que el material compuesto 15%-250µm tuvo una disminución el 44% mientras que el compuesto 15%-600µm una reducción del 51%.

Nuevamente el material compuesto con un tamaño de 250µm posee el valor de resistencia más alto de los 3 tamaños y de igual forma con 600µm el cual obtiene el menor valor de resistencia a flexión de los 3 mientras que para 150µm se obtiene un valor intermedio de resistencia a flexión tendencia que se repite para las para los 3 diferentes porcentajes de refuerzo.

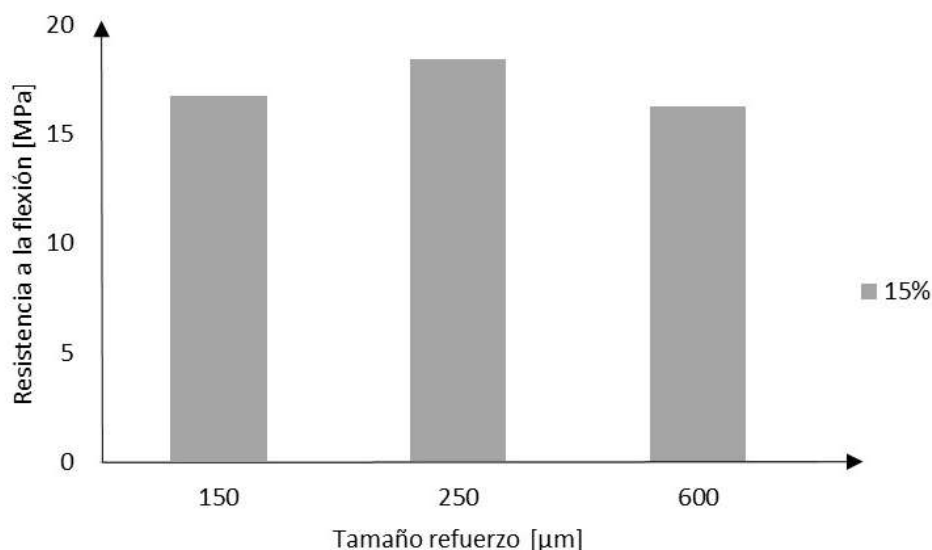


Figura 3.38. Efecto del tamaño de refuerzo en la resistencia a la flexión para 15% del mismo.
(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.15 muestran los resultados del método de análisis de varianza (ANOVA) del tamaño de partícula sobre la resistencia a flexión, para determinar la significancia al variar el tamaño de partícula del refuerzo. El valor p es 0,18276, por lo que se acepta la hipótesis nula, es decir, a pesar de que existen efectos al variar el tamaño del refuerzo dichos efectos no son significativos en la resistencia a flexión.

Tabla 3.15. ANOVA del tamaño de partícula sobre la resistencia a flexión.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Valor p	F crítico
Entre grupos	127,87802	2	63,93901	2,28643	0,18276	5,14325
Dentro de los grupos	167,78702	6	27,96450			
Total	295,66504	8				

(Fuente: Propia)

3.5.4.2. Efecto del porcentaje de refuerzo

A continuación, se analizó el efecto que causa el porcentaje en peso del refuerzo en el material compuesto durante el ensayo de flexión manteniendo constante el tamaño de la partícula.

En la Figura 3.39 se observan diagramas de barras que representan el valor de resistencia a la flexión para una composición con 150µm y diferentes porcentajes en peso del refuerzo. Se observa que el mayor valor de resistencia a la flexión se obtuvo para 10% de refuerzo.

Mientras que para los otros dos porcentajes se obtuvieron valores inferiores. Para el material compuesto 5%-150 μ m se tiene un valor de 12,1MPa para el material compuesto 10%-150 μ m un valor de 21,4MPa y finalmente para el material compuesto 15%-150 μ m una resistencia de 16,7MPa valores que siguen estando por debajo del valor del polipropileno puro. El primero sufrió una reducción de 64%, segundo del 36% y el último una disminución del 50%.

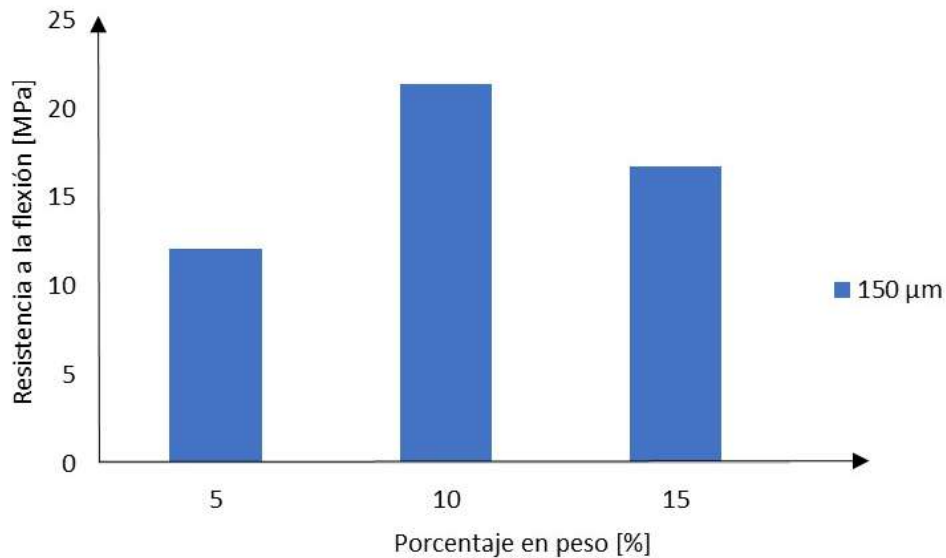


Figura 3.39. Efecto del porcentaje de refuerzo en la resistencia a la flexión para 150 μ m.
(Fuente: Propia)

En la Figura 3.40 se observan diagramas de barras que representan el valor de resistencia a la flexión para una composición con 250 μ m y diferentes porcentajes en peso del refuerzo. Se observa que el mayor valor de resistencia a la flexión se obtuvo para 10% de refuerzo nuevamente. Mientras que para los otros dos porcentajes se obtuvieron valores inferiores. Para el material compuesto 5%-250 μ m se tiene un valor de 24,3MPa, es decir, una reducción del 27%, para el material compuesto 10%-250 μ m un valor de 31MPa con una reducción únicamente del 7% y finalmente para el material compuesto 15%-250 μ m una resistencia a la flexión de 18,4MPa equivalente una reducción del 45%. El material compuesto 10%-250 μ m obtuvo las mejores características a flexión en presente estudio tal y como se observa en las Figuras 3.37 y 3.40.

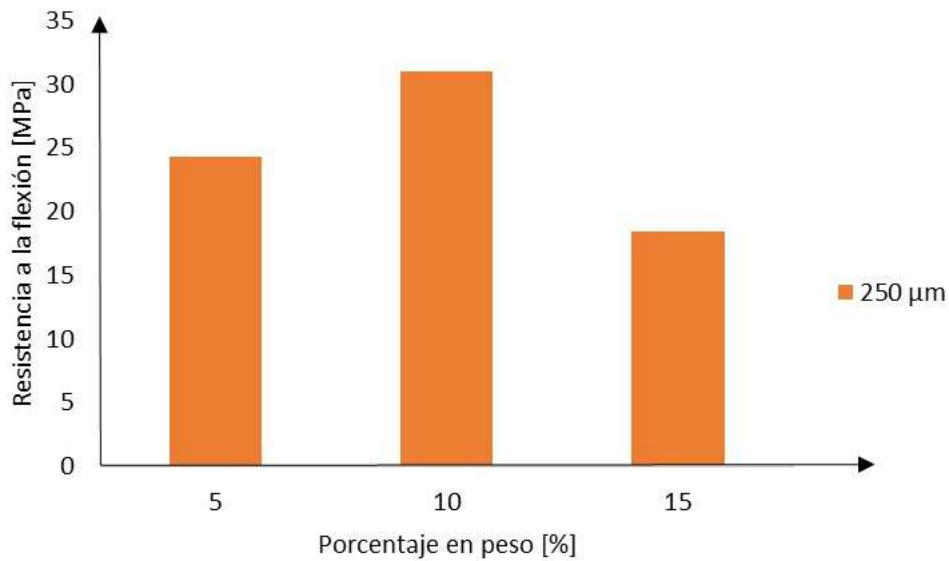


Figura 3.40. Efecto del porcentaje de refuerzo en la resistencia a la flexión para 250μm.
(Fuente: Propia)

Se observa en la Figura 3.40 los valores de resistencia a la flexión para una composición con 600μm y diferentes porcentajes en peso del refuerzo. Se observa que el mayor valor de resistencia a la flexión se obtuvo para 5% de refuerzo. Mientras que para los otros dos porcentajes se obtuvieron valores inferiores. Para el material compuesto 5%-600μm se tiene un valor de 21,30MPa, es decir, una reducción del 36%, para el material compuesto 10%-600μm un valor de 11,78MPa con una reducción del 64% y finalmente para el material compuesto 15%-600μm una resistencia a la flexión de 16,28MPa equivalente una reducción del 51%.

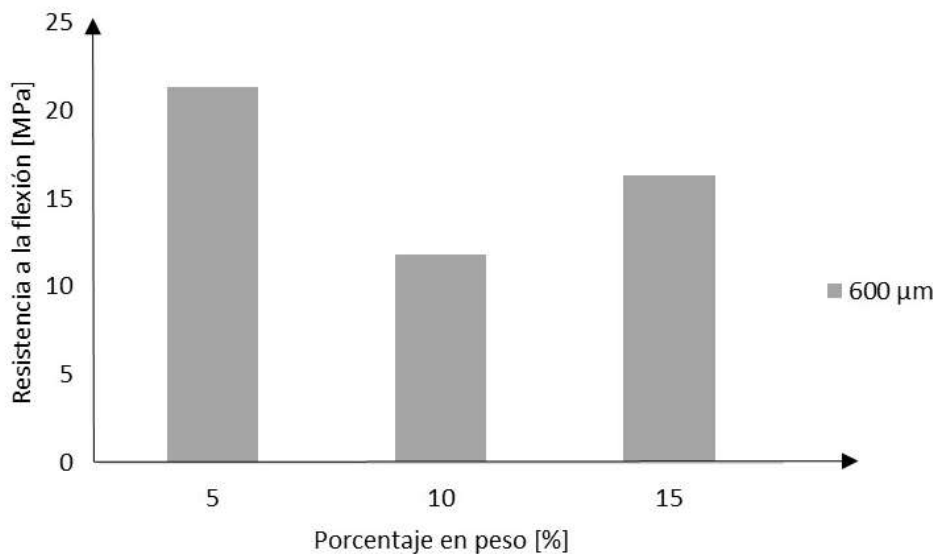


Figura 3.41. Efecto del porcentaje de refuerzo en la resistencia a la flexión para 600μm.
(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.16 se muestran los resultados del método de análisis de varianza (ANOVA) del porcentaje en peso sobre la resistencia a flexión, para determinar la significancia o no de variar la cantidad de refuerzo. El valor p es 0,75000, por lo que se acepta la hipótesis nula, es decir, a pesar de que existen efectos al aumentar la cantidad de refuerzo dichos efectos no son significativos en la resistencia a flexión.

Tabla 3.16. ANOVA del porcentaje en peso de refuerzo sobre la resistencia a flexión.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Valor p	F crítico
Entre grupos	27,03493	2	13,51747	0,30192	0,75000	5,14325
Dentro de los grupos	268,63011	6	44,77169			
Total	295,66504	8				

(Fuente: Propia)

Estudios realizados por Cárdenas (2012) [45], Samariha et al. (2015) [50] y Lisperguer et al. [51] (2013) y Lázaro Karen [46] al aumentar la cantidad de refuerzo ocurre un incremento en la resistencia a flexión, hecho que no ocurrió en el presente estudio debido a las porosidades en la superficie, vacíos dentro de las probetas. Imperfecciones que actúan como concentradores de esfuerzos.

3.5.4.3. Comparación del material compuesto con la matriz

En la Tabla 3.17 se muestran propiedades como resistencia a la tracción, elongación en el punto de fluencia, resistencia a la tracción en rotura, elongación máxima y módulo de elasticidad del material virgen y del material compuesto que obtuvo las mejores propiedades mecánicas.

Tabla 3.17 Resumen de propiedades de 100%PP y el material compuesto con las mejores características a flexión.

Composiciones	Resistencia a la flexión [MPa]		Deformación en el punto máximo [%]	
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
100%PP	33	2,612	4,17	0,302
10%-250 μ m	31	5,078	3,368	0,430

(Fuente: Propia)

Con los valores obtenidos de la tabla anterior se puede trazar curvas de esfuerzo vs. deformación unitaria tanto del polipropileno puro y del material compuesto en una misma gráfica como se observa en la Figura 3.42.

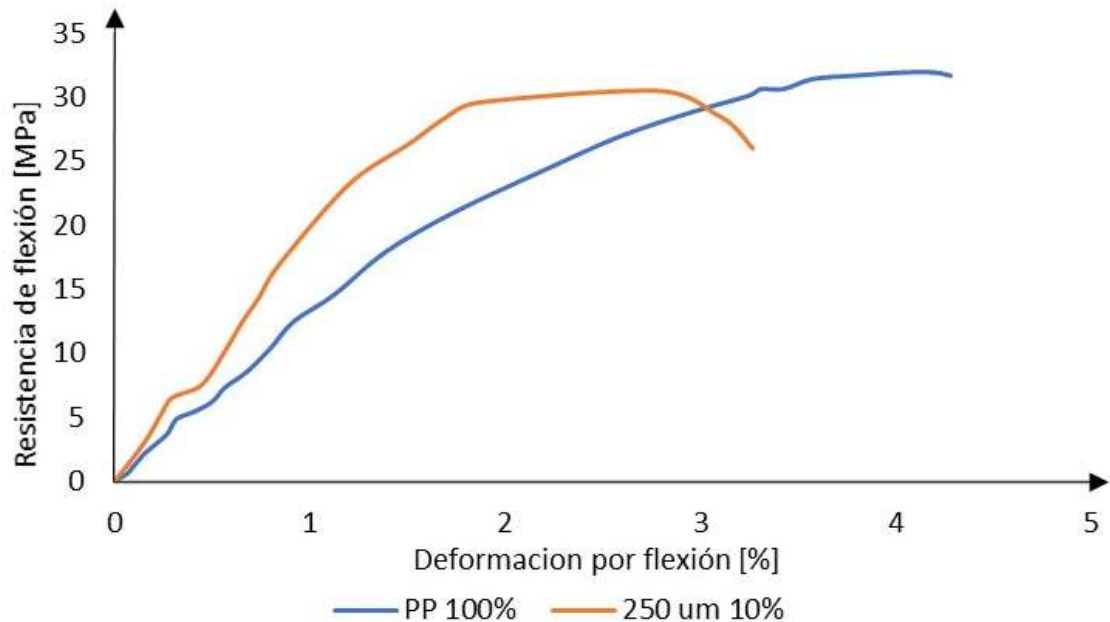


Figura 3.42. Curva de la resistencia a la tracción vs. deformación del polipropileno con el material compuesto con las mejores características.
(Fuente: Propia)

3.5.4.4. Análisis de la fractura

La causa de la fractura en las probetas que fueron sometidas al ensayo de flexión, al igual que en el caso de tracción, fue generada por las porosidades e imperfecciones presentes mismas que son concentradores de esfuerzos. En la Figura 3.43 se exponen las imperfecciones más comunes de las probetas.



Figura 3.43. Sección transversal de cada composición del material compuesto ensayado a flexión.
(Fuente: propia).

En la Figura 3.43 se presenta una muestra de cada material compuesto sometido a flexión, en cual se pueden observar las imperfecciones presentes en cada una, las mismas que son ampliadas en la Figura 3.44.

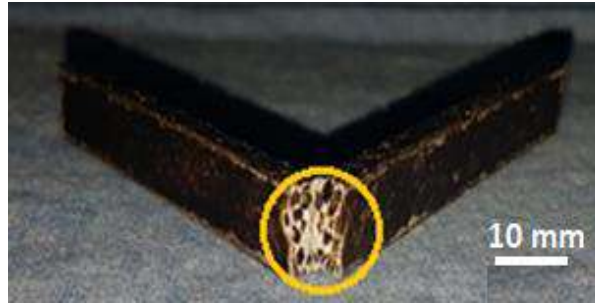


Figura 3.44. Sección transversal de probetas sometidas a flexión.
(Fuente: propia)

El material compuesto que mejores propiedades a flexión presentó, fue la composición 10%-250 μ m, el mismo tiene un porcentaje de flexión del 3.37%, el cual es un valor cercano al 4.17% del polipropileno puro. Los cuales se muestran el Figura 3.45.



Figura 3.45. Sección frontal de las probetas sometidas a flexión, a) composición 10%-250 μ m y b) 100%PP.
(Fuente: Propia)

Como se mencionó en el acápite 3.2, acerca del origen de las porosidades detalladamente, se puede observar que el espécimen de composición 10%-250 μ m fue el que presentó mejores características a flexión, esto se debe a internamente tuvo una correcta distribución del refuerzo con menos porosidades e imperfecciones, resultando en una mejor interfaz entre la matriz y el refuerzo

3.5.5. Ensayo de impacto IZOD

Una vez realizados los ensayos de flexión según la norma ASTM D256-10 se obtuvieron los resultados promedios mostrados en la Tabla 3.18 de energía de impacto, energía por unidad de longitud y energía por unidad de área cada uno con su coeficiente de variación respectivo, el cual posee valores altos debido a dos motivos. Primero, al ser la muestra pequeña se obtienen valores de coeficientes de variación más grandes que al tener una muestra grande, y el segundo motivo es debido a las porosidades del material compuesto, las cuales provocan que los resultados del ensayo sean dispersos.

Tabla 3.18. Propiedades de los materiales compuestos obtenidas después de someter las probetas al ensayo de impacto.

Composiciones	Energía de impacto		Energía / longitud		Energía / área	
	(J)	C.V.	(J/m)	C.V.	(kJ/m ²)	C.V.
5%-150µm	0,1688	27,96	17,4205	27,88	1,28708	28,19
5%-250µm	0,3940	55,61	42,1131	55,51	3,09686	54,93
5%-600µm	0,1834	18,65	24,5198	17,46	1,81849	17,49
10%-150µm	0,2182	51,47	28,3896	49,21	2,11659	49,44
10%-250µm	0,1580	30,25	17,0396	29,90	1,25947	29,82
10%-600µm	0,135	24,44	19,38	24,15	1,429	24,49
15%-150µm	0,2686	47,36	30,0165	47,17	2,21682	46,70
15%-250µm	0,2744	26,57	31,6261	26,13	2,33736	26,14
15%-600µm	0,4741	73,95	55,1126	37,45	4,06645	25,72

(Fuente: Propia)

Se puede observar en la Figura 3.46 una rotura completa una vez finalizado el ensayo de impacto IZOD bajo la norma ASTM D 256-10.



Figura 3.46. Condiciones finales de las probetas de los materiales compuestos sometidos al ensayo de impacto.

(Fuente: Propia)

3.5.5.1. Efecto del tamaño de partícula

A continuación, se analizó el efecto que causa el tamaño de la partícula de refuerzo en el material compuesto durante el ensayo de flexión manteniendo constante el porcentaje en peso del mismo.

En la Figura 3.47 se observan los valores de energía de impacto para una composición con el 5% de refuerzo en peso y diferentes tamaños de partículas. Se aprecia que para un tamaño de 150 μm posee una energía de impacto de 0,1688J al aumentar el tamaño a 250 μm la energía de impacto aumenta el más de doble hasta 0,3940J, pero al aumentar aún más el tamaño hasta 600 μm la energía de impacto disminuye hasta 0,1834J. Muestra la misma tendencia que la resistencia a flexión, cuando se tiene un tamaño de 250 μm la energía de impacto es mayor que con partículas de 150 μm y 600 μm . El material compuesto 5%-250 μm sufre una disminución en su energía de impacto del 55% dándonos un valor de 0,3940J.

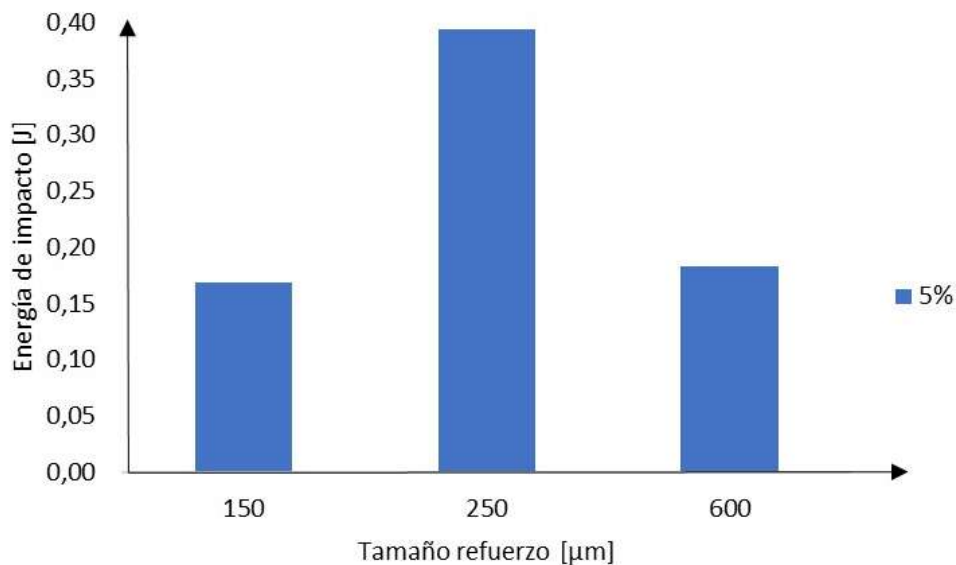


Figura 3.47. Efecto del tamaño de refuerzo en la energía de impacto para 5% del mismo.
(Fuente: Propia)

Se observa en la Figura 3.48 los valores de energía de impacto para una composición con 10% de refuerzo en peso y diferentes tamaños de partículas. Se observa que a medida que aumenta el tamaño de partícula la energía de impacto disminuye, para un tamaño de 150 μm se tiene un valor energía de impacto de 0,2182J al aumentar el tamaño a 250 μm la energía de impacto disminuye a 0,1580J y al aumentar aún más el tamaño hasta 600 μm la energía de impacto sigue disminuyendo hasta 0,1350J. El material compuesto 10%-150 μm sufrió una reducción del 75% en su energía de impacto.

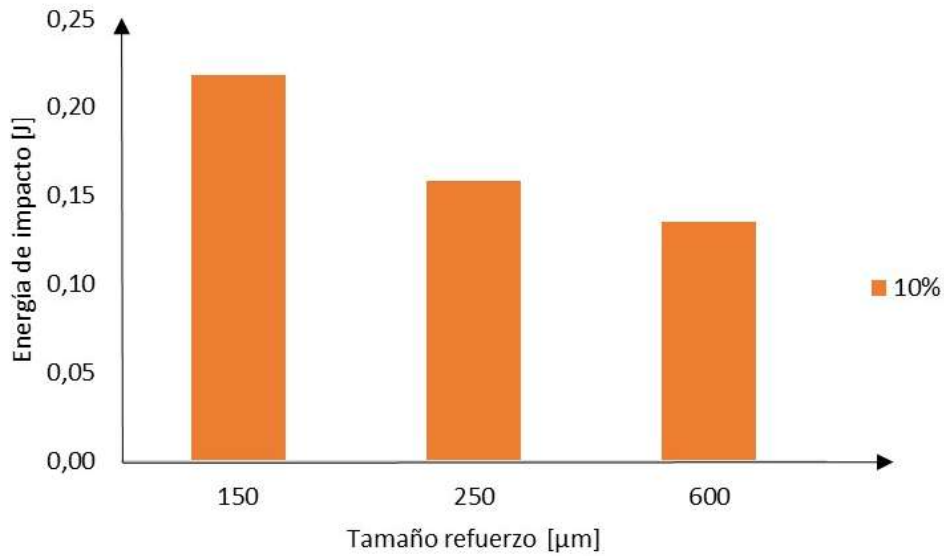


Figura 3.48. Efecto del tamaño de refuerzo en la energía de impacto para 10% del mismo.
(Fuente: Propia)

El material compuesto 15%-150μm sufrió la menor reducción en la energía de impacto con un 45% como se indica en la Figura 3.49. A medida que aumenta el tamaño de partícula la energía de impacto aumenta, para un tamaño de 150μm se tiene una energía de impacto de 0,2686J al aumentar el tamaño a 250 μm la energía de impacto sufre un ligero aumento y al aumentar aún más el tamaño hasta 600 μm la energía de impacto aumenta hasta 0,4741J.

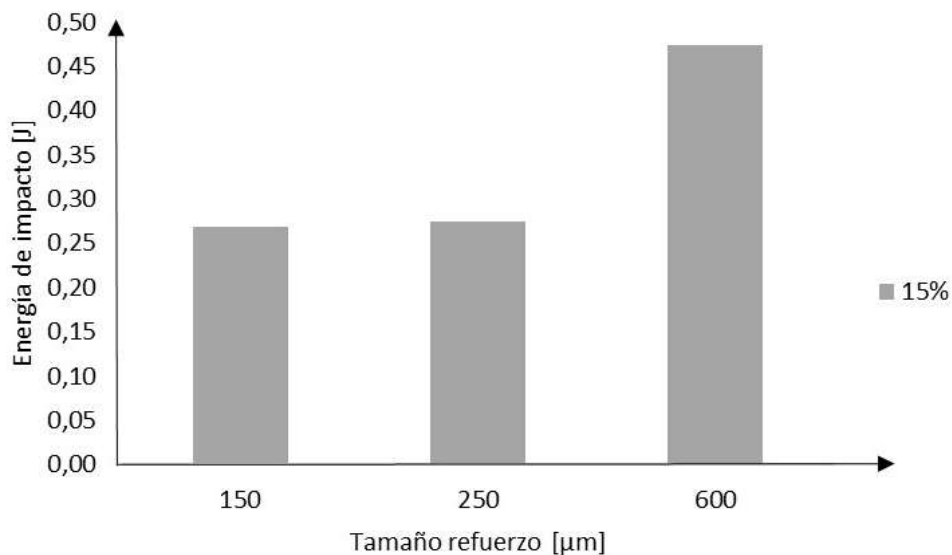


Figura 3.49. Efecto del tamaño de refuerzo en la energía de impacto para 5% del mismo.
(Fuente: Propia)

En el estudio de Kinochita et al. (2009) [52] señala que la energía de impacto que absorben las probetas de materiales compuestos con refuerzo natural aumenta al incrementar el tamaño del refuerzo. En el presente estudio no se observó dicho comportamiento debido a

las imperfecciones presentes en las probetas de las diferentes composiciones del material compuesto. A pesar de eso el material compuesto 15%-600µm que absorbió la mayor cantidad de energía antes de fractura posee el mayor tamaño de partículas (600µm) corroborando lo que establece Kinochita et al. (2009) en su estudio.

En la Tabla 3.19 se muestran los resultados del método de análisis de varianza (ANOVA) del tamaño de partícula sobre la energía de impacto, para determinar la significancia o no de variar el tamaño del refuerzo. El valor p es 0,85293, por lo que se acepta la hipótesis nula, es decir, no existen efectos significativos en la energía de impacto al variar la cantidad de refuerzo.

Tabla 3.19. ANOVA del tamaño de partícula sobre la energía de impacto.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Valor p	F crítico
Entre grupos	0,00545	2	0,00273	0,16337	0,85293	5,14325
Dentro de los grupos	0,10011	6	0,01668			
Total	0,10556	8				

(Fuente: Propia)

3.5.5.2. Efecto del porcentaje de refuerzo

Se analizó el efecto que causa el porcentaje en peso del refuerzo en el material compuesto durante el ensayo de impacto mientras se mantiene constante el tamaño de la partícula.

En la Figura 3.50 se observan diagramas de barras que representan el valor de resistencia a la flexión para una composición de 150µm y los diferentes porcentajes en peso del refuerzo. Se observa que el mayor valor de energía de impacto se obtuvo para 15% de refuerzo, de igual manera se observa que a medida que aumenta el porcentaje de refuerzo también aumenta la energía de impacto. Se obtuvieron reducciones del 81% 75% y 70% respectivamente en los materiales compuestos mostrados

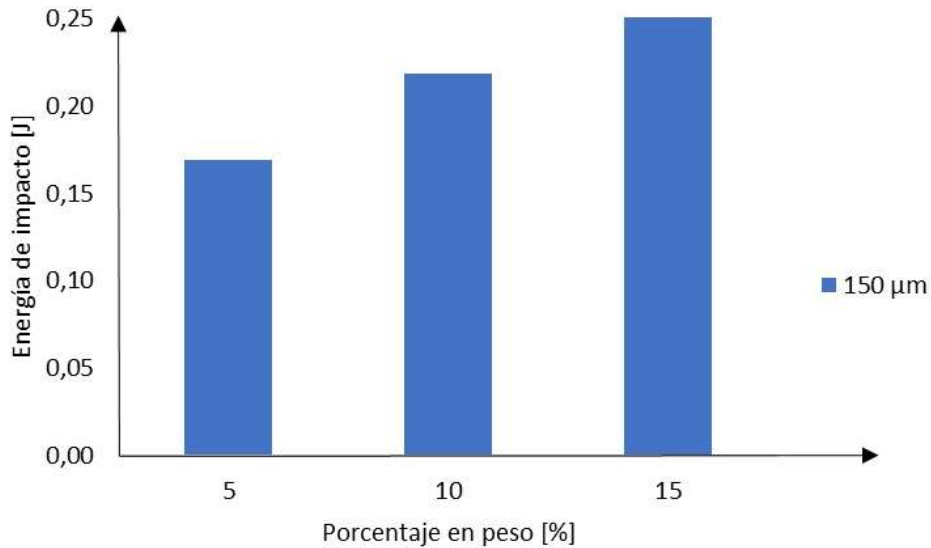


Figura 3.50. Efecto del porcentaje de refuerzo en energía de impacto para 150 μ m.
(Fuente: Propia)

En la Figura 3.51 se observan los valores energía de impacto para una composición de 250 μ m y diferentes porcentajes en peso del refuerzo. La composición 5%-250 μ m a pesar de tener una reducción del 55% en la energía de impacto es la composición con mayor energía en comparación con las otras dos, las cuales sufrieron reducciones del 82% y 68%.

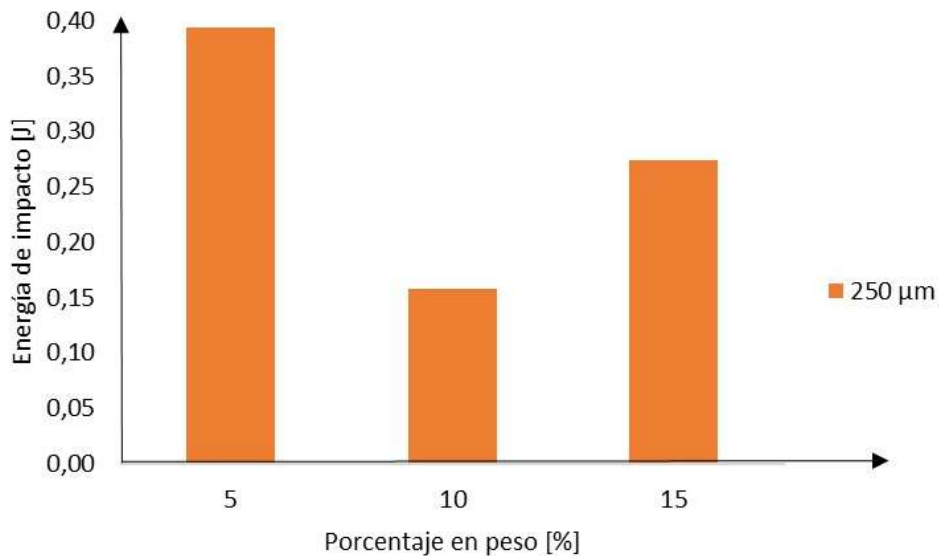


Figura 3.51. Efecto del porcentaje de refuerzo en la energía de impacto para 250 μ m.
(Fuente: Propia)

Como se observa en la Figura 3.52 la composición 15%-600 μ m alcanzó un valor de 0,4741J de energía de impacto, siendo este el material compuesto con mayor energía de impacto. El material compuesto 5%-600 μ m sufrió una reducción del 79% mientras que el material

compuesto 10%-600 μ m una reducción del 84% y finalmente el material compuesto 15%-600 μ m una disminución del 45%

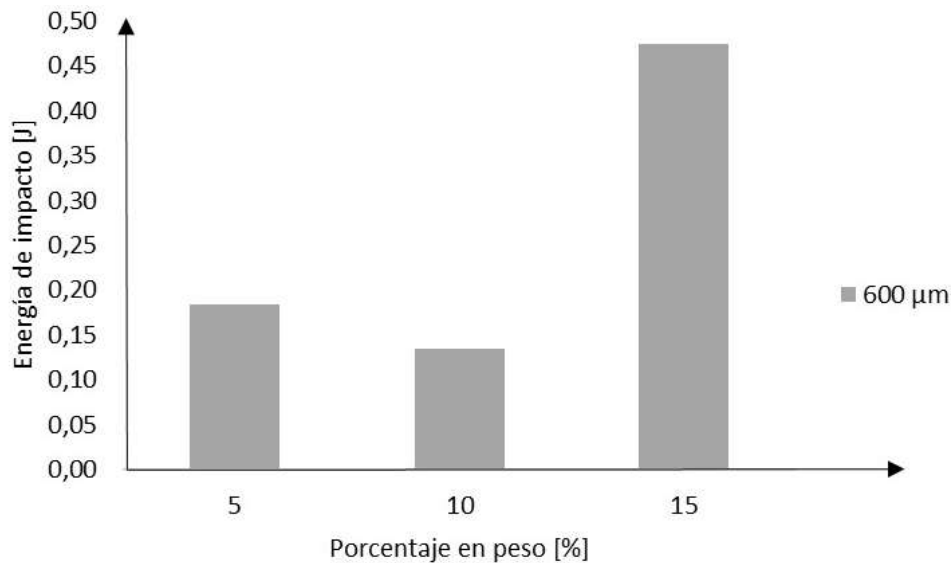


Figura 3.52. Efecto del porcentaje de refuerzo en la resistencia a la flexión para 150 μ m. (Fuente: Propia)

En la Tabla 3.20 se muestran los resultados del método de análisis de varianza (ANOVA) del porcentaje en peso del refuerzo sobre la energía de impacto, para determinar la significancia o no de variar la cantidad de refuerzo. El valor p es 0,21089, por lo que se acepta la hipótesis nula, es decir, no existen efectos significativos en la energía de impacto al variar la cantidad de refuerzo.

Tabla 3.20. ANOVA del tamaño de partícula sobre la energía de impacto.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Valor p	F crítico
Entre grupos	0,04273	2	0,02136	2,04004	0,21089	5,14325
Dentro de los grupos	0,06283	6	0,01047			
Total	0,10556	8				

(Fuente: Propia)

3.5.5.3. Comparación del material compuesto con la matriz

En la Tabla 3.21 se muestran propiedades como resistencia a la tracción, elongación en el punto de fluencia, resistencia a la tracción en rotura, elongación máxima y módulo de elasticidad del material virgen y del material compuesto que obtuvo los mejores resultados.

Tabla 3.21. Resumen de propiedades de 100%PP y el material compuesto con las mejores características en el ensayo de impacto.

Composiciones	Energía de impacto	Energía / longitud	Resistencia al impacto
	[MPa]	(J/m)	(kJ/m ²)
100%PP	0,8668	137,99	10,20
10%-600µm	0,4741	55,1126	4,06

(Fuente: Propia)

3.5.5.4. Análisis de la fractura

Al hacer el análisis de fractura a las probetas sometidas al ensayo a impacto, se debe tomar en cuenta las zonas expuestas, donde se aplica la carga de impacto. Se puede también observar que todas las muestras sometidas a este tipo de ensayo presentan una fractura frágil sin deformación, causada por la baja tenacidad que poseen los materiales compuestos.

En el desarrollo del análisis de fractura por impacto, los principales defectos a considerar son las discontinuidades y porosidades. En la Figura 3.53 se muestran probetas antes y después del ensayo a impacto, los defectos que tienen las probetas y la zona afectada por el impacto del péndulo.

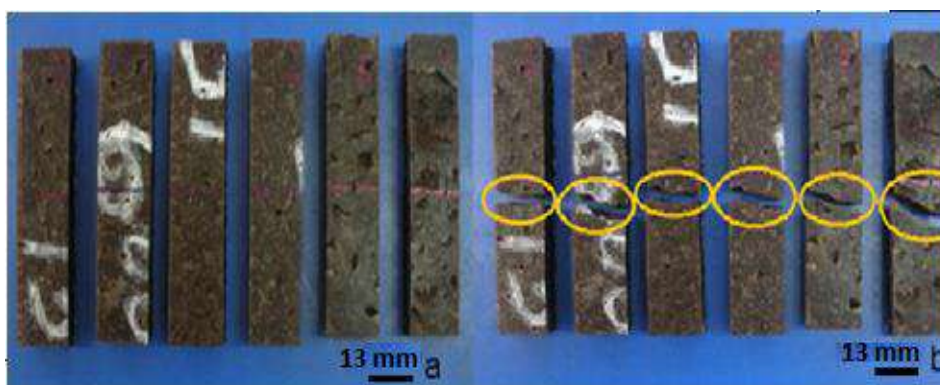


Figura 3.53. Probetas bajo la norma ASTM D256-10, a) Antes del ensayo, b) Después del ensayo. (Fuente: Propia)

En la Figura 3.53. (b) se observa el tipo de fractura, la cual tiende a ir diagonalmente siguiendo las porosidades que existen en el material compuesto. En la Figura 3.54. (b) se observan probetas de 100%PP, donde la fractura tiende a ir en línea recta, esto se debe a que no posee discontinuidades y las porosidades son mínimas.

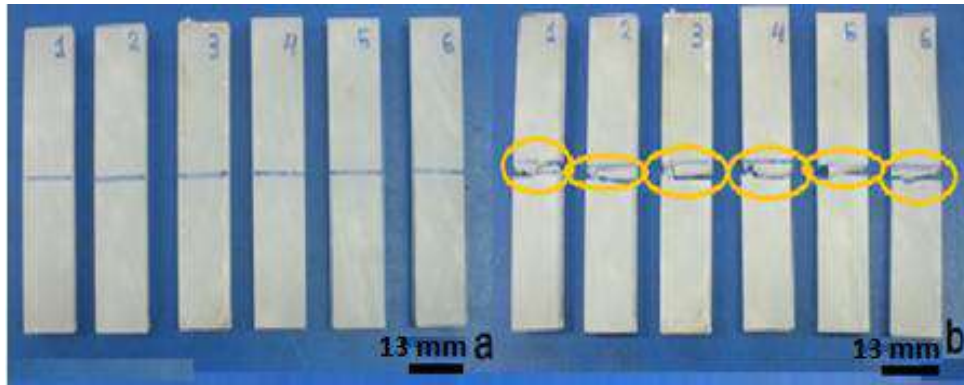


Figura 3.54. Probetas de 100%PP sometidas al ensayo de impacto, a) antes del ensayo, b) después del ensayo.
(Fuente: Propia)

En la Figura 3.55 se muestran todas las probetas sometidas a impacto, en la cual se evidencia que la fractura tiende a seguir las porosidades e imperfecciones presentes en los materiales compuestos en todas sus composiciones.



Figura 3.55. Fractura de todas las probetas sometidas a impacto.
(Fuente: Propia)

Al analizar los resultados obtenidos de la prueba de impacto, se obtiene que el material compuesto con mejores resultados fue el de composición 15%-600 μ m, siendo también el espécimen con la mejor resistencia a la tracción, esto se debe a que posee menos discontinuidades y porosidades en su estructura. En la Figura 3.56 se presenta el material compuesto de mayor resistencia al impacto. Al analizar el tipo de fractura se observa que 3 de las 6 probeta tienden a fracturarse en línea recta, en la zona del impacto. Esto quiere decir que es el material que menos porosidades y discontinuidades posee.

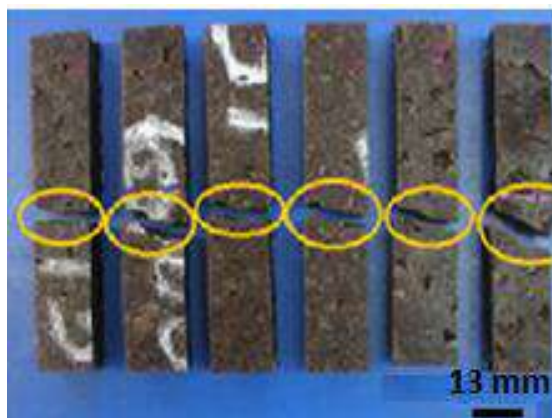


Figura 3.56. Material compuesto 15%-600µm, con mayor resistencia al impacto.
(Fuente: Propia)

3.5.6. Caracterización térmica del material compuesto.

La caracterización térmica se realiza al polipropileno virgen y el material compuesto que presentó mejores características mecánicas determinadas en la sección 3.1, el cual contiene un porcentaje en peso de 15% refuerzo y con un tamaño de 600µm. Se realiza el ensayo térmico con el fin de estudiar el comportamiento del material compuesto frente a condiciones de temperatura.

3.6.1. Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

En la Figura 3.57 se observa el termograma DSC comparativo de las muestras ensayadas. En la Tabla 3.22 se muestra la temperatura de fusión (T_m), entalpia de fusión (h_m), temperatura de cristalización (T_c), temperatura de transición vítrea y el grado de cristalización de las dos muestras.

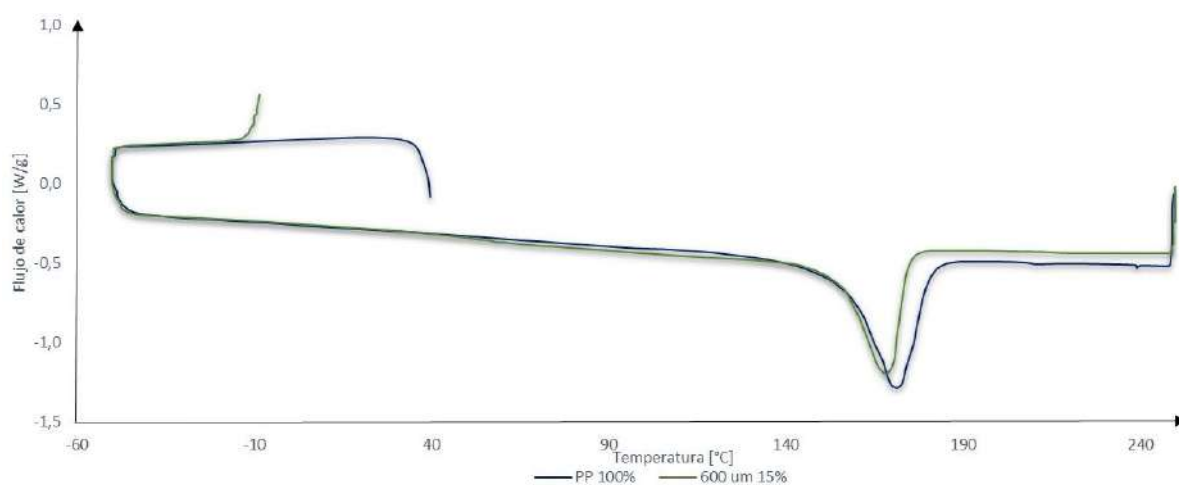


Figura 3.57. Termograma DSC de las muestras ensayadas.
(Fuente: Propia)

Tabla 3.22. Propiedades térmicas obtenidas del ensayo DSC.

Composiciones	Tm(°C)	hm (J/g)	Tc (°C)	Xc (%)
100%PP	171.42	53.2122	122	31.3
15%-600µm	168.28	34.6308	122	20.37

(Fuente: Propia)

Los cálculos realizados para obtener los datos de la Tabla 3.22 se presenta en el Anexo 9. Al visualizar que los resultados obtenidos no presentan una diferencia significativa, esto quiere decir que el refuerzo no tiene una variación considerable en las propiedades térmicas del polipropileno, como se puede observar en la Figura 3.58 el punto de fusión del polipropileno es de 171.42°C y del material compuesto es de 168.28°C, por lo cual ha bajado el punto de fusión del material compuesto en 3.14°C, esto representa una disminución en la temperatura de punto de fusión del 1.83%.

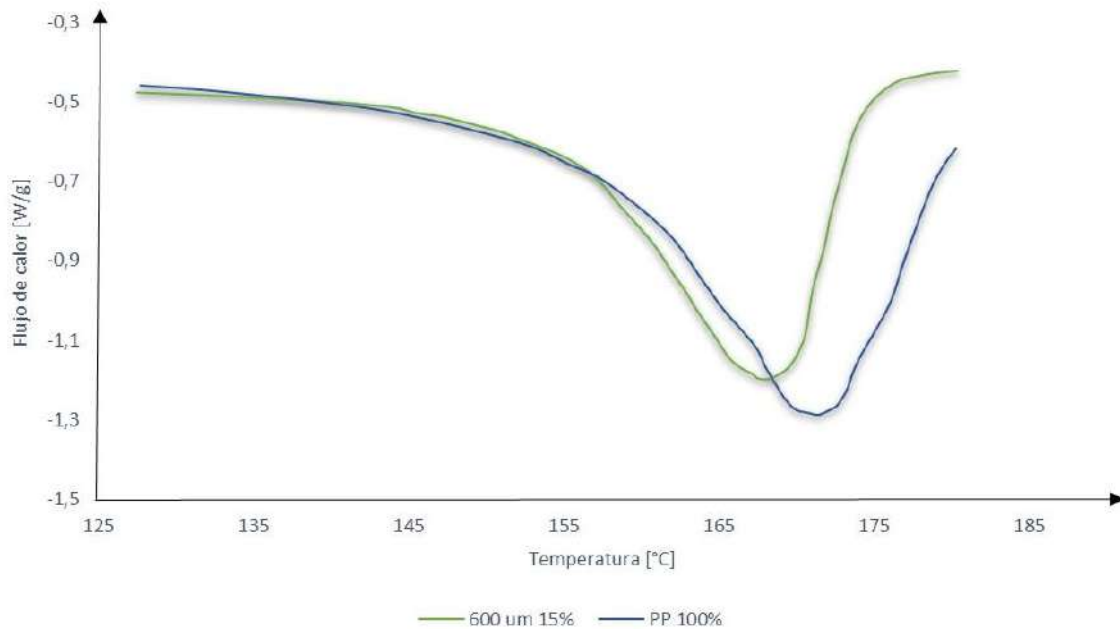


Figura 3.58. Termograma DSC de la sección de fusión de las muestras ensayadas.
(Fuente: Propia)

La grafica mostrada en la Figura 3.58 es una ampliación del proceso endotérmico que se produce en la zona de fusión. Se puede observar claramente las diferencias de entalpias entre ambos especímenes, ya que la diferencia entre las superficies es notable; sin el de mayor superficie o entalpia la del polipropileno al 100%.

En las Figuras 3.59 y Figura 3.60, se muestra los termogramas individuales, donde se muestra una caída de la pendiente, siendo esta muy sutil nos permite determinar la temperatura de transición vítrea (Tg).

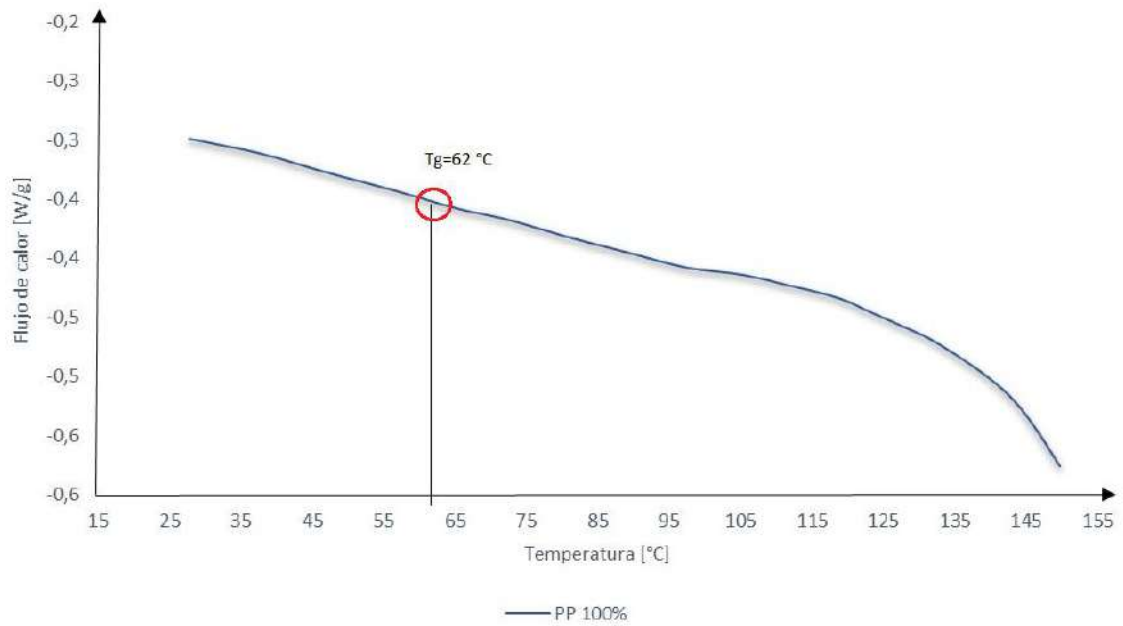


Figura 3.59. Termograma ampliado para la zona Tg del 100%PP.
(Fuente: Propia)

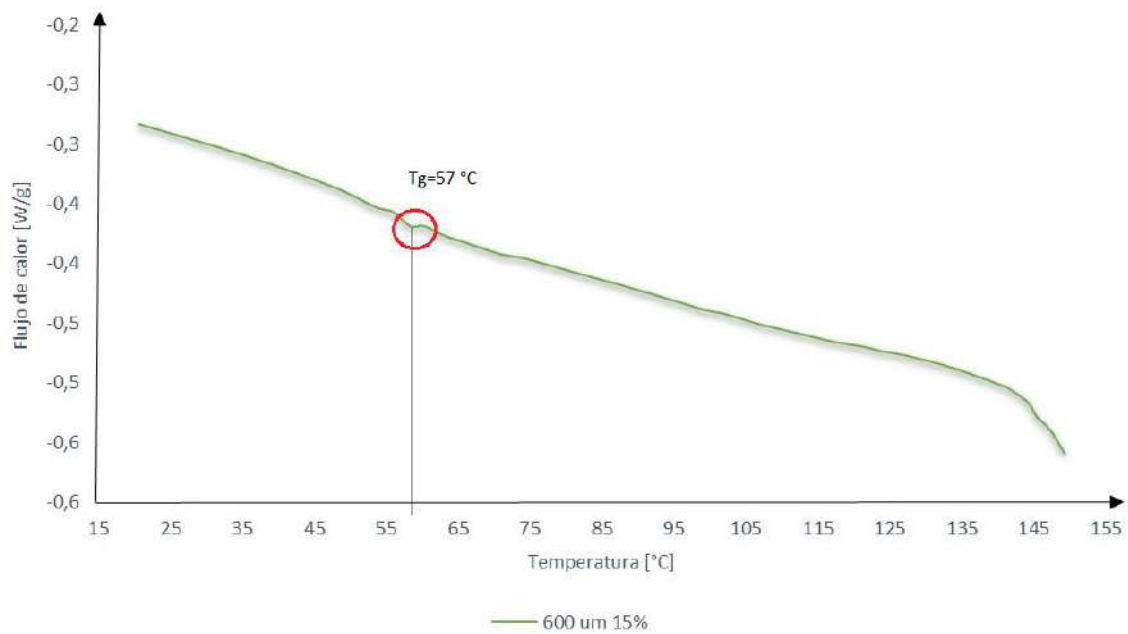


Figura 3.60. Termograma ampliado para la zona Tg del material compuesto 15%-600μm
(Fuente: Propia)

En el Tabla 3.23 se presentan los valores de temperatura de transición vítrea Tg en °C obtenidos mediante las Figuras 3.59 y Figura 3.60.

Tabla 3.23. Temperatura de transición vítrea

Composiciones	Tg (°C)
100%PP	62
15%-600μm	57

(Fuente: Propia)

La temperatura de transición vítrea es muy importante, ya que nos indica a que temperatura el material empieza a tener un aspecto cauchoso. La temperatura de Tg del PP obtenida es de 62 °C y 15%-600µm de 57 °C, esto quiere decir que el material compuesto necesita menos entalpia de transición vítrea.

En la Figura 3.61 y 3.62 se muestra una ampliación de la zona de inicio de cristalización de las muestras analizadas por DSC. Esta zona de cristalización se analiza gráficamente, donde observe un ligero cambio de pendiente en la gráfica de DSC quiere decir el inicio de cristalización del material. Las temperaturas se muestran en la Tabla 3.24.

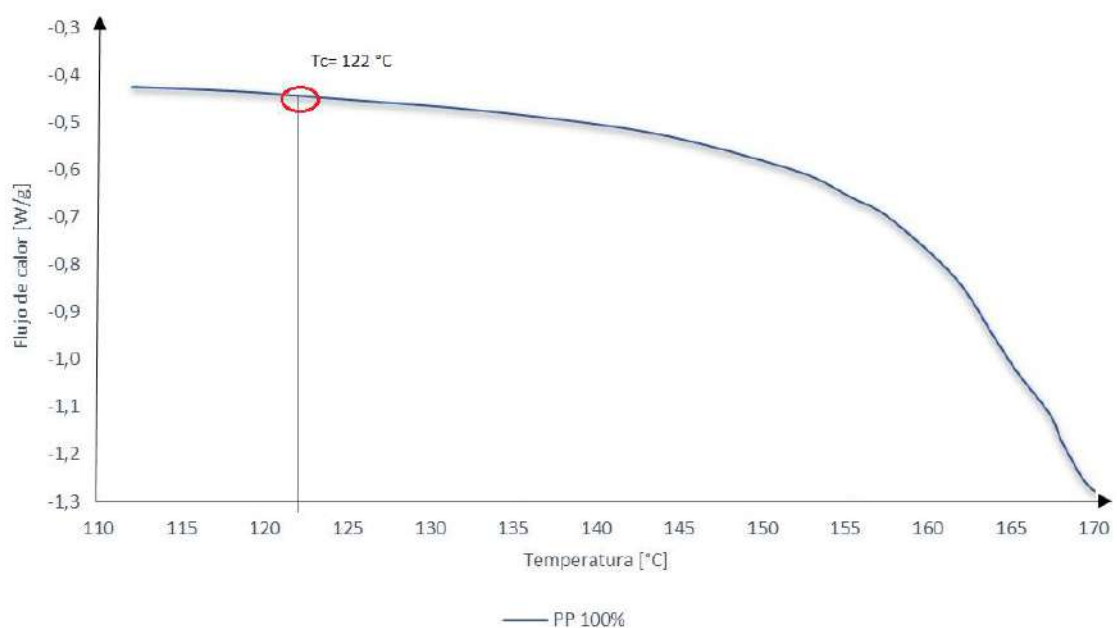


Figura 3.61. Termograma ampliado para la zona Tc del 100%PP.
(Fuente: Propia)

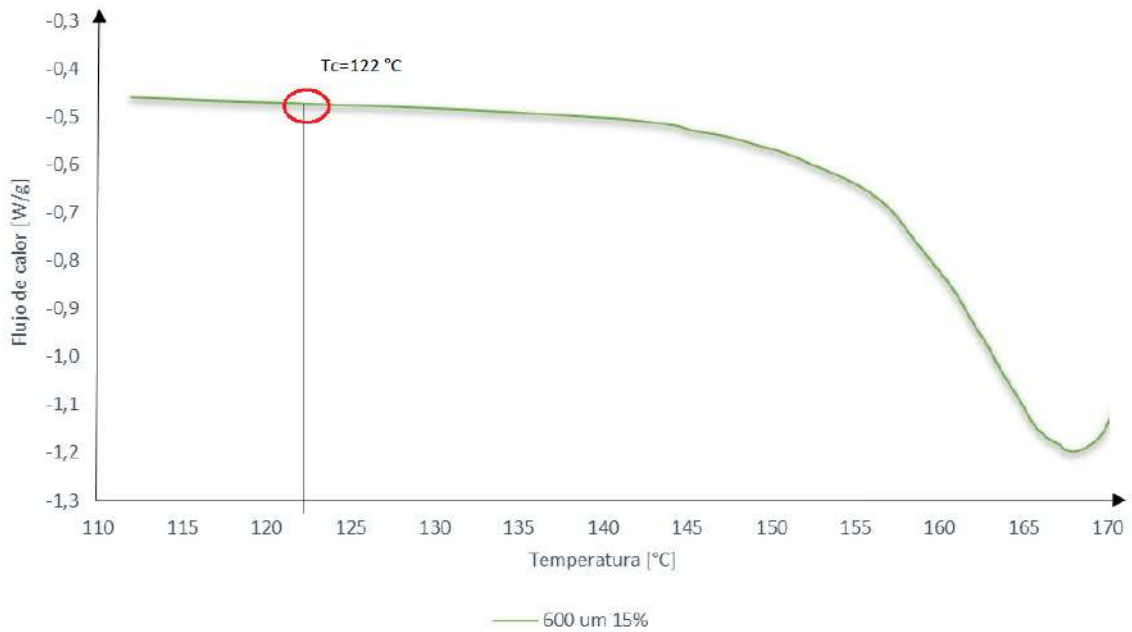


Figura 3.62. Termograma ampliado para la zona Tc del material compuesto 15%-600µm.
(Fuente: Propia)

Al obtener los resultados mostrados en la Tabla 3.24, se observa que para ambos casos no existe una variación de inicio de cristalización para ambas muestras estudiadas.

Tabla 3.24. Temperatura de cristalización

Composiciones	Tc (°C)
100%PP	122
15%-600µm	122

(Fuente: Propia)

3.6. Comparación con otros autores

En esta sección se presenta una comparación entre la composición con menor reducción de propiedades mecánicas y otras investigaciones en las que el material de refuerzo fue endocarpio de coco pulverizado. Cabe recalcar que el presente estudio se realizó para el fruto de una planta que es originaria de esta parte del mundo (Ecuador y Colombia) donde únicamente se le da un uso ornamental así que se seleccionó investigaciones en las que la matriz fue reforzada con *cocos nucifera*, el cual se da en muchas regiones del mundo y existen investigaciones parecidas al presente estudio como se detalla en la Tabla 3.25.

Tabla 3.25 Resumen de las diferentes matrices y porcentaje de refuerzos realizados en investigaciones similares

Investigaciones	Matriz	Cantidad de refuerzo (%)
Bledzki et al.	Polipropileno	40
Sapuan y Harimi	Epoxi	15
Sarki et al.	Epoxi	10
Husseinsyah y Mostapha	Poliéster	15

(Fuente: Propia)

En la Figura 3.63 se muestra una comparación de la resistencia a la tracción del presente estudio con otros autores. Como se puede observar en la Tabla 3.25 el estudio de Bledzki et al. (2010) [53] empleó una matriz de polipropileno reforzado con el 40% peso del refuerzo. Se alcanzó un valor de 23MPa, lo cual equivale a un 54% más de resistencia a la tracción que el presente estudio. En el estudio de Sapuan y Harimi (2003) [19] se realizaron pruebas mecánicas con la intención de analizar la viabilidad del endocarpio de coco pulverizado como refuerzo, para esto se empleó una matriz epóxica con un porcentaje de 15% de refuerzo obteniendo un valor de 35,48MPa lo cual supera en 130% este estudio. Sarki et al (2011) [21] emplearon una matriz epóxica con refuerzo de endocarpio de coco al 10% con una resistencia a la tracción del 31,82MPa, es decir, un 113% mayor que el presente caso de estudio. En la investigación de Husseinsyah y Mostapha (2011) [54] emplearon como matriz un poliéster reforzado de igual manera con endocarpio de coco pulverizado obteniendo una resistencia a la tracción de 23MPa, es decir, 54% más que en este estudio.

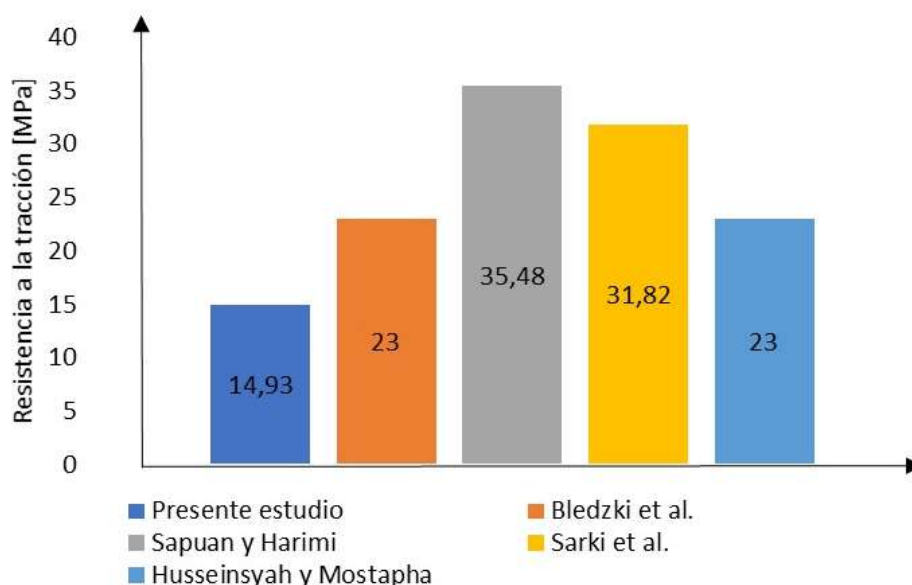


Figura 3.63. Comparación de la resistencia a tracción con otras investigaciones (Fuente: Propia)

Se observa en la figura anterior que el material compuesto de mejores propiedades de este estudio obtuvo la menor resistencia a tracción en comparación con los demás autores debido principalmente a las porosidades existentes en las probetas. En la Figura 3.64 se puede ver que en presente el estudio y en los trabajos de Bledzki et al. (2010) [53] y Husseinsyah y Mostapha (2011) [54] la elongación es baja, es decir, el material se comporta de manera frágil cuando se emplea este tipo de refuerzo. Se obtuvo un valor de 2,022% Mientras que nosotros dos estudios se alcanzó un 3,3% de elongación, es decir, un 38% menos debido a las porosidades presentes.

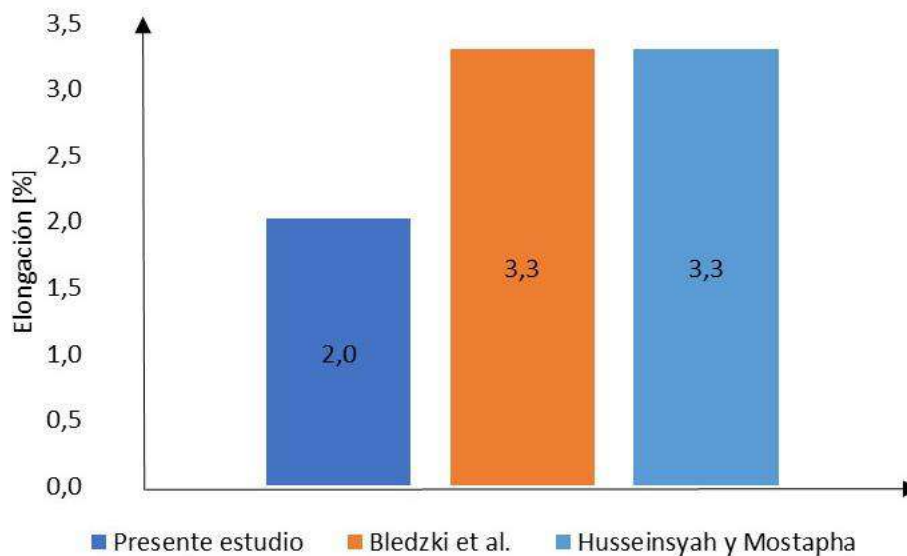


Figura 3.64. Porcentaje de elongación en el ensayo a tracción de otros autores. (Fuente: Propia)

De la figura anterior se puede decir que el material compuesto del presente estudio es un material menos dúctil, es decir, es más rígido que los compuestos de los otros estudios, lo cual se comprueba en la Figura 3.65 dónde se observa que el módulo es mucho mayor que el obtenido por Sarki et al (2011) y de igual manera mayor que el de Husseinsyah y Mostapha.

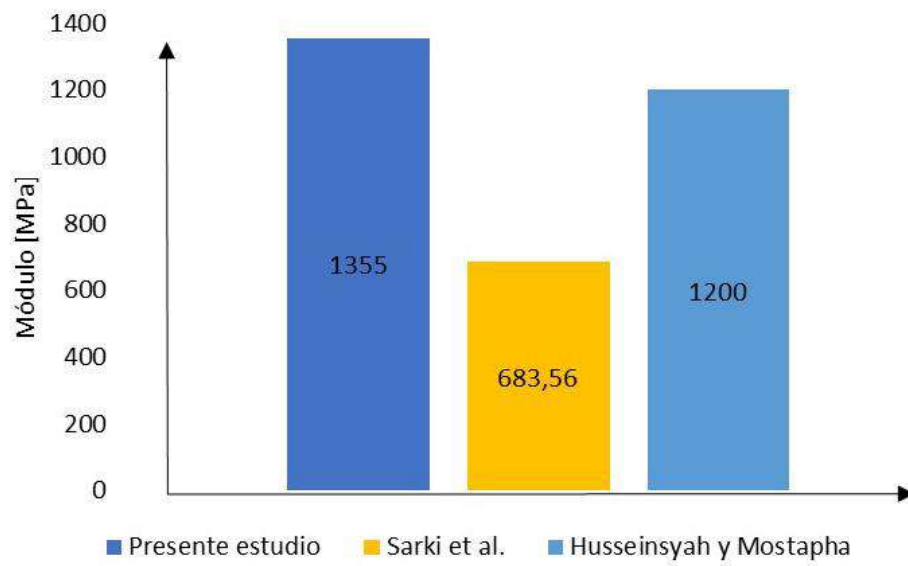


Figura 3.65. Módulo de elasticidad de otros autores.
(Fuente: Propia)

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1. Conclusiones

- Se caracterizó un material compuesto de matriz de polipropileno reforzado con endocarpio de coco de la sierra pulverizado mediante moldeo por compresión. Se modificó el porcentaje en peso del refuerzo, así como su tamaño; a la vez que se mantuvo constante el porcentaje de agente compatibilizante.
- El material compuesto 15%-600 μ m fue el que obtuvo mayor índice de fluidez. Es la composición con más cantidad de porcentaje de refuerzo y mayor tamaño, por lo tanto, existirá mayor degradación durante el proceso de extrusión causado por la alta temperatura y fricción dentro del cilindro.
- Los parámetros para la obtención de tableros para los ensayos de flexión y tracción fueron tiempo de precalentamiento 30min, temperatura de precalentamiento de 165°C, tiempo de calentamiento 15min, temperatura de calentamiento de 165°C, tiempo de moldeo 15 min temperatura de moldeo 165°C tiempo de enfriamiento 30 min a temperatura de enfriamiento 20°C.
- Los parámetros de moldeo en la obtención de tableros para ensayos de impacto fueron tiempo de precalentamiento 45min, temperatura de precalentamiento de 165°C, tiempo de calentamiento 20min, temperatura de calentamiento de 165°C, tiempo de moldeo 20min temperatura de moldeo 165°C tiempo de enfriamiento 40min a temperatura de enfriamiento 20°C.
- El material compuesto 15%-600 μ m fue el que sufrió la menor reducción en sus propiedades mecánicas a tracción al comparar con las propiedades del polipropileno puro. Con una resistencia de 15,93MPa y elongación de 2,7% lo cual significa una reducción el 42% y 29%, respectivamente.
- A pesar de las imperfecciones presentes en las probetas, el material compuesto 10%-250 μ m alcanzó 31MPa de resistencia a flexión, lo cual equivale a una reducción de solo 6% al compararlo con la matriz.

- El material compuesto 15%-600 μ m presentó la menor reducción en sus propiedades al ser sometido al ensayo de impacto IZOD. Alcanzó 0,4741J de energía de impacto, es decir, una reducción del 45% en comparación con polipropileno puro.
- El proceso de desgasificación pudo no ser correcto debido a las porosidades encontradas dentro de los pellets del material compuestos en sus diferentes composiciones lo cual provocó que el material se comporte de manera frágil y sus propiedades mecánicas disminuyan.
- A demás los resultados de los ensayos mecánicos (tracción, flexión e impacto) realizados a las distintas composiciones del material compuesto fueron inferiores a las propiedades de la matriz, debido a la geometría irregular del refuerzo, aglomeración de partículas y baja interacción entre la matriz y el refuerzo.
- Al tener una matriz con baja ductilidad, sumado a las imperfecciones encontradas en las probetas provoca que la ductilidad final de los materiales compuestos se reduzca considerablemente, provocando una fractura frágil en todos los ensayos realizados.
- La temperatura de fusión del material compuesto 15%-600 μ m es de 168,28°C mientras que 100%PP es de 171,42 °C, es decir, existe una diferencia de 3,14 °C en la temperatura de fusión. El tipo de refuerzo utilizado por ser de origen natural no genera un cambio considerable en las propiedades térmicas del polipropileno.

4.2. Recomendaciones

- Se aconseja un estudio similar con métodos de elaboración distintos para evaluar el efecto que causa el método de procesamiento en el desarrollo de materiales compuestos.
- Se recomienda variar el porcentaje o el agente compatibilizante y analizar la influencia que este tendría sobre las propiedades mecánicas de las diferentes composiciones de materiales compuestos.
- Se sugiere aumentar el porcentaje y tamaño de refuerzo para evaluar los efectos que podría causar.

Referencias Bibliográficas

- [1] ASEPLAS, «Guía de la industria plástica ecuatoriana,» Grafipren, Guayaquil, 2017.
- [2] V. H. Guerrero, J. L. Dávila, S. Galeas, P. Pontón, N. M. Rosas, V. Sotomayor y C. Valdivieso, Nuevos Materiales aplicaciones estructurales e industriales, 1ra ed., Quito: Imprefepp, 2011.
- [3] V. M. Sánchez Hinojosa, «Establecimiento de un protocolo para la obtención de embriones somáticos tanto en medio sólido como en suspensión celular, a partir de embriones inmaduros de Palma de Coco Cumbé(Parajubaea cocoide Burret), (Tesis de Pregrado),» Sangolquí, 2013.
- [4] W. Smith y J. Hashemi, Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales, 4ta ed., Barcelona: Mc Graw Hill, 2007.
- [5] D. R. Askeland, P. P. Fulay y W. J. Wright, Ciencia e ingeniería de los materiales, 6ta ed., CENGAGE Learning.
- [6] S. K. Mazumdar, Composites manufacturing: Materials, products and process engineering, 1ra ed., CRC Press, 2003.
- [7] W. D. Callister y D. G. Rethwisch, Materials science and engineering: An Introduction, 9na ed., Jhon Wiley & Sons, 2014.
- [8] K. Oksman, Wood-Polimer Composites, CRC Press, 2008.
- [9] A. Saxena, J. Schaffer, S. Antolovich y T. Sanders, Ciencia y diseño de materiales para ingeniería, 1ra ed., México: Cecsa, 2000.
- [10] M. Ashby, Materials selection in mechanical desing, 4ta ed., Burlington: Elsevier, 2011.
- [11] J. Cevallos Espinosa y J. Tenesaca Bravo, «Obtención y caracterización de materiales compuestos Híbridos de matriz de polipropileno reforzadas con fibra de vidrio y abacá mediante moldeo por compresión (Tesis de,» Quito, 2012.
- [12] A. Wechsler y S. Hiziroglu, «Some of the properties of wood plastic composites,» *Build and Enviroment*, vol. 42, nº 7, pp. 2637-2644, Julio 2007.
- [13] D. Villamar, «Caracterización de materiales compuestos lignocelulósicos obtenidos mediante extrusión (Tesis de Pregrado),» Quito, 2013.
- [14] A. Mortensen, Concise Encyclopedia of Composite Materials, 2007.
- [15] H. S. Yang, M. Wolcott, H. S. Kim, S. Kim y H. J. Kim, «Effect of different compatibilizing agents on the mechanical properties of lignocellulosic material filled polyethylene biocomposites,» *Composite Structures*, vol. 79, nº 3, pp. 369-375, 2007.
- [16] P. Ponton, «Materiales Compestos, apuntes de clase de MEC9Q3,» Quito, 2020.
- [17] P. Mallick, Fiber-Reinforced Composites: Materials, manufacturing and desing, 3ra ed., CRC Press, 2008.

- [18] L. Fuglsang, *Composite Materials: Properties as influenced by phase geometry*, Springer, 2005.
- [19] S. M. Sapuan y M. Harimi, «Mechanical properties of epoxy/coconut shell filler particle composites,» *The Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 28, pp. 171-181, Octubre 2003.
- [20] J. C. Paez Moscoso, «Obtención de Compuesto de Polipropileno Reforzado con Fibras de Abaca Mediante Moldeo por Compresión (Tesis de pregrado),» Quito, 2007.
- [21] J. Sarki, S. B. Hassan, V. Aigbodion y J. Oghenevw, «Potential of using coconut shell particle fillers in eco-composite materials,» *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 509, pp. 2381-2385, Noviembre 2011.
- [22] P. Prinsen, «Composición química de diversos materiales lignocelulósicos de interés industrial y análisis estructural de sus ligninas. (Tesis de Maestría),» Sevilla, 2010.
- [23] A. J. Yáñez Pacios, «Tratamiento superficial de materiales compuestos de madera y plástico (WPCs) para mejorar sus propiedades de adhesión (Tesis de Doctorado),» Alicante, 2016.
- [24] R. Gilbert, *Cellulosic polymers, blends and composites*, Hanser Publishers, 1994.
- [25] E. Sjöström, *Wood chemistry. Fundamentals and Applications*, San Diego: Academic Press, 1993.
- [26] F. F. J. Paz, «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 (Tesis de Pregrado),» 2008.
- [27] D. Squire, *Guía completa para seleccionar, cultivar y propagar 220 especies de Palmeras y Cidáceas*, 1ra ed., Barcelona: BLUME, 2008.
- [28] S. D. Granados y G. López Ríos, «Manejo de la palma de coco,» *Chapingo*, pp. 39-48, 2002.
- [29] F. Levy, *Compósitos estructurais: Ciencia e tecnologia*, Sao Paulo: Brasial: Edgar Blücher, 2006.
- [30] R. Moriana, «Desarrollo y caracterización de biocomposites enfibrados procedentes de recursos renovables. Estudio de su degradación en tierra (Tesis Doctoral),» Valencia, 2010.
- [31] C. Rauwendal, *Understanding Extrusion*, Munich: Hanser Publishers, 1998.
- [32] M. Beltrán Rico y A. Marcilla, *Tecnología de polímeros. Procesado y propiedades*, Universidad de Alicante, 2012.
- [33] D. H. Morton-Jones, *Polymer Processing*, Londres: Chapman & Hall, 1998.
- [34] V. H. Hidalgo, J. L. Davila, S. Galeas, P. Ponton, N. M. Rosas, V. Sotomayor y C. Valdivieso, *Nuevos Materiales aplicaciones estructurales e industriales*, 1ra ed., Quito: Imprefepp, 2011.

- [35] K. Sanjay, Composites manufacturing, Materials, Products and Process Engineering, CRC Press, 2002.
- [36] A. F. Trujillo y L. S. Arias, «El coco, recurso renovable para el diseño de materiales verdes,» *Entre ciencia e Ingeniería*, vol. 7mo, nº 14, pp. 93-100, 2013.
- [37] F. Parra Cevallos, «Desarrollo de formulaciones a partir de Residuos de plástico de invernadero reciclado con poliolefinas (Tesis de pregrado),» Quito, 2011.
- [38] G. J. Pilaguano y P. J. Vizueta, «Caracterización de Compuestos de Polipropileno Reforzados con Polvo de Bambú y Nanoarcillas Obtenidos Mediante Extrusión e Inyección,» Quito, 2017.
- [39] T. S. Da Cunha, «Produção e caracterização de nanocompósitos de polipropileno, poliestireno-butadieno-estireno) e montmorilonita,» Porto Alegre, 2010.
- [40] G. M. Correa Pillajo y D. H. Tuarez Navarrete, «Caracterización de un compuesto de madera plástica obtenido mediante extrusión y reforzado con polvo de bambú y nanoarcillas (Tesis de pregrado),» Quito, 2019.
- [41] TA Instruments - Waters, «Differential scanning calorimeter - Q Series Getting Started Guide,» vol. 40, pp. 470-470, 2007.
- [42] A. F. R. G. y L. M. A. Ríos, «Estabilidad de procesamiento de polímeros: índice de degradación en proceso,» *Revista Digital de la Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería de la UJTL*, vol. 5, nº 1, pp. 37-45, 2015.
- [43] J. R. Lerma, «Interempresas,» 12 09 2017. [En línea]. Available: <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/193925-Indice-de-fluidez-su-importancia-real.html>.
- [44] M. C. Sifontes y M. E. Domine, Lignina, estructura y aplicaciones: métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial, Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2013.
- [45] A. Cárdenas, «Evaluación de la eficiencia como preservante antifúngico del borato de zinc y su efecto en las propiedades físicas y mecánicas de materiales compuestos de plástico y madera de pino (Tesis Mg. Sc. Productos Forestales),» Guadalajara, 2012.
- [46] K. C. Lázaro León, H. E. Gonzáles Mora y A. J. Cárdenas Oscanoa , «Propiedades mecánicas del material compuesto elaborado con bambú (*Guadua angustifolia* Kunth) y polipropileno.,» *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, vol. 7, nº 38, pp. 95-110, 2016.
- [47] V. K. y Y. S. N. R. Malkapuram, «Recent Development in Natural Fiber Reinforced Polypropylene Composites,» , vol. 28, nº 10, pp. 1169 - 1189, 2009.,» *REINFORCED PLASTICS AND COMPOSITES*, vol. 28, nº 10, pp. 1169-1189, 2009.
- [48] M. S. H. M. R. a. M. I. Idrus, «Treated Tropical Wood Sawdust-Polypropylene Polymer Composite: Mechanical and Morphological Study,» *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology* , vol. 2, pp. 435-444, 2011.

- [49] H. Q. W. G. H. F. Y. Y. K. a. S. S. Liu, «Compatibilizing and toughening bamboo flour-filled HDPE composites: Mechanical properties and morphologies,» *Applied Science and Manufacturing*, vol. 39, nº 12, pp. 1891-1900, 2008.
- [50] A. H. I. G. B. B. a. M. N. A., «Effects of nanoclay contents on properties of bagasse flour/reprocessed high density polyethylene/nanoclay composites,» *Maderas. Ciencia y tecnología*, vol. 17, nº 3, pp. 637-346, 2015.
- [51] J. X. B. Y. S. C. E. y. H. V. Lisperguer, «Efecto de las Características de Harina de Madera en las Propiedades físico-mecánicas y térmicas de Polipropileno Reciclado,» *Maderas. Ciencia y tecnología*, vol. 15, nº 3, pp. 321-336, 2013.
- [52] K. K. M. F. H. T. K. K. a. K. I. Kinochita H., «Development of green composite consists of woodchips, bamboo fibers and biodegradable adhesive,» *Composites Part B: Engineering*, vol. 15, nº 3, pp. 607-612, 2009.
- [53] A. K. Bledzki, A. A. Mamun y J. Volk, «Barley husk and coconut shell reinforced polypropylene composites: The effect of fibre physical, chemical and surface properties,» *Composites Science and Technology*, vol. 70, pp. 840-846, Enero 2010.
- [54] S. Husseinsyah y M. Mostapha, «The Effect of Filler Content on Properties of Coconut Shell Filled Polyester Composites,» *Primalaysian Polymer journal*, vol. 6, pp. 87-97, 2011.
- [55] E. Barbero, *Introduction to composite materials design*, 3ra ed., CRC Press, 2017.
- [56] J. Shakelford y R. Doremus, *Ceramics and glass materials: Structure, properties and processing*, Nueva York: Springer, 2008.
- [57] J. P. Davim, *Machining of metal matrix composites*, Springer, 2011.
- [58] S. M. Leal, E. Fonseca Santos, C. A. Ferreira y S. M. Bohrz, «Studies on the Properties of Rice-Husk-Filled-PP Composites Effect of Maleated PP,» *Materials Research*, vol. 12, nº 3, pp. 333-338, 2009.

Anexos

Anexo I. Polipropileno H 502HC



Polipropileno H 502HC

Descripción:

Homopolímero

El H 502HC es un homopolímero de bajo índice de fluidez diseñado específicamente para aplicaciones que requieren rigidez extremadamente alta y buena procesabilidad. Tiene excelente resistencia química y propiedades de barrera.

Aplicaciones:

Base para tapetes, Electrodomésticos, Empaques para envasado en caliente, Piezas con elevada rigidez, Platos desechables, Vasos

Procesos:

Extrusión de Rafia, Moldeo por inyección, Termoformado

Propiedades de control

Característica	Método	Unidades	Valores
Índice de Fluidez (230°C/2,16 kg)	D 1238	g/10 min	3.3

Propiedades típicas^a

Característica	Método	Unidades	Valores
Densidad	D 792	g/cm ³	0.905
Módulo de Flexión, Secante al 1%	D 790	MPa	1950
Resistencia a la Tracción en el Punto de Fluencia	D 638	MPa	38
Elongación en el punto de Fluencia	D 638	%	7
Dureza Rockwell (Escala R)	D 785	-	108
Resistencia al Impacto Izod a 23°C	D 256	J/m	25
Temperatura de Deflexión Térmica a 0,455 MPa	D 648	°C	130
Temperatura de Deflexión Térmica a 1,820 MPa	D 648	°C	68
Temperatura de Ablandamiento Vicat a 10 N	D 1525	°C	160

a) Pruebas en muestra moldeada por inyección según la norma ASTM D 4101.

Observaciones Finales

1. La información de este documento se suministra de buena fe e indica valores típicos obtenidos en nuestros laboratorios y no debe ser considerada como absoluta ni constituye ninguna garantía. Solo las propiedades y valores que constan en el certificado de calidad constituyen la garantía del producto.
2. En algunas aplicaciones, Braskem ha desarrollado resinas a medida para cumplir requisitos específicos.
3. En caso de dudas sobre el uso o para discutir otras aplicaciones, contactar al área de servicios técnicos de Braskem.
4. Para obtener información acerca de seguridad, manipulación, protección individual, primeros auxilios y eliminación de residuos, consultar la Ficha de datos de seguridad de productos químicos (FDS/SDS), Registro CAS: 9003-07-0.
5. Para obtener informaciones reglamentarias del producto, consultar el Documento Regulatorio o contactar al Área de Servicios Técnicos de Braskem.
6. Los valores que constan en este documento pueden cambiar sin previa comunicación de Braskem.
7. Esta resina no contiene la sustancia Bisfenol A (BPA, CAS: 80-05-7) en su composición.

Anexo II. Tabla de especificaciones del MAPP

Composición	8-10 wt anhídrido maleico
Viscosidad	4 poise (190 °C)
punto de fusión	156 °C
Índice de acidez	47 mg KOH/g
Temperatura de transición	157 °C
Densidad	0,934 g/mL a 25 °C

Anexo III. Planos del molde

Anexo IV. Densidad teórica de material comuesto

A continuación, se presenta un ejemplo de cálculo de la densidad teórica del material compuesto de 250 μm y 5% de endocarpio de coco.

$$\rho_T = \vartheta_{PP}\rho_{PP} + \vartheta_{MAPP}\rho_{MAPP} + \vartheta_{EN}\rho_{EN}$$

Donde:

ρ_T = Densidad teórica

x_{PP} = Porcentaje en peso del polipropileno

ϑ_{PP} = Fracción volumétrica del polipropileno

ρ_{PP} = Densidad del polipropileno

x_{MAPP} = Porcentaje en peso del MAPP

ϑ_{MAPP} = Fracción volumétrica del MAPP

ρ_{MAPP} = Densidad del MAPP

x_{EN} = Porcentaje en peso del endocarpio de coco

ϑ_{EN} = Fracción volumétrica del endocarpio de coco

ρ_{EN} = Densidad del endocarpio de coco

Antes de calcular a densidad de material compuesto se encuentra la densidad del material de refuerzo.

$m_1 = 48,87$ Masa del pictómetro

$m_2 = 54,58$ Masa del pictómetro + endocarpio de coco

$m_3 = 102,11$ Masa del pictómetro + endocarpio de coco + agua destilada

$m_4 = 100,31$ Masa del pictómetro + agua destilada

$$V_{EN} = (m_4 - m_1) - (m_3 - m_2)$$

$$V_{EN} = (100,31 - 48,87) - (102,11 - 54,58)$$

$$V_{EN} = 51,44 - 47,53$$

$$V_{EN} = 3,91 [cm^3]$$

$$\rho_{EN} = \frac{m}{V_{EN}}$$

$$\rho_{EN} = \frac{48,87 g}{3,91 [cm^3]}$$

$$\rho_{EN} = 12,50 \left[\frac{g}{cm^3} \right]$$

El promedio de la densidad del endocarpio de coco es $10,44 \left[\frac{g}{cm^3} \right]$, para una masa total de 100 gramos se tiene:

$$x_{PP} = 92 g$$

$$\rho_{PP} = 0,905 \frac{g}{cm^3}$$

$$x_{MAPP} = 3 g$$

$$\rho_{MAPP} = 0,934 \frac{g}{cm^3}$$

$$x_{EN} = 5 g$$

$$\rho_{EN} = 10,44 \frac{g}{cm^3}$$

$$\vartheta_{PP} = \frac{\frac{x_{PP}}{\rho_{PP}}}{\frac{x_{PP}}{\rho_{PP}} + \frac{x_{MAPP}}{\rho_{MAPP}} + \frac{x_{EN}}{\rho_{EN}}}$$

$$\vartheta_{PP} = \frac{\frac{92 g}{0,905 \frac{g}{cm^3}}}{\frac{92 g}{0,905 \frac{g}{cm^3}} + \frac{3 g}{0,934 \frac{g}{cm^3}} + \frac{5 g}{10,44 \frac{g}{cm^3}}}$$

$$\vartheta_{PP} = 0,96496$$

$$\vartheta_{MAPP} = \frac{\frac{x_{MAPP}}{\rho_{MAPP}}}{\frac{x_{PP}}{\rho_{PP}} + \frac{x_{MAPP}}{\rho_{MAPP}} + \frac{x_{EN}}{\rho_{EN}}}$$

$$\vartheta_{MAPP} = \frac{\frac{3 \text{ g}}{0,934 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}}{\frac{92 \text{ g}}{0,905 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} + \frac{3 \text{ g}}{0,934 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} + \frac{5 \text{ g}}{10,44 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}}$$

$$\vartheta_{MAPP} = 0,03049$$

$$\vartheta_{EN} = \frac{\frac{x_{EN}}{\rho_{EN}}}{\frac{x_{PP}}{\rho_{PP}} + \frac{x_{MAPP}}{\rho_{MAPP}} + \frac{x_{EN}}{\rho_{EN}}}$$

$$\vartheta_{EN} = \frac{\frac{5 \text{ g}}{10,44 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}}{\frac{92 \text{ g}}{0,905 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} + \frac{3 \text{ g}}{0,934 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} + \frac{5 \text{ g}}{10,44 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}}$$

$$\vartheta_{EN} = 0,00455$$

Reemplazando en la ecuación original:

$$\rho_T = \vartheta_{PP}\rho_{PP} + \vartheta_{MAPP}\rho_{MAPP} + \vartheta_{EN}\rho_{EN}$$

$$\rho_T = 0,96496 \left(0,905 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) + 0,03049 \left(0,934 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) + 0,00455 \left(10,44 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right)$$

$$\rho_T = 0,94923 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Anexo V. Resultados del ensayo del índice de fluidez.

5%-150 μ m

Test Procedure : CUSTOM TTT-ASTM			
Test Condition : ASTM D1238 L			
Temperature : 230.0 °C			
Nominal Load : 2.160 kg			
Die Length : 8.00 mm			
Die Diameter : 2.095 mm			
Preheating Without Load	: 300.00 s	Material Type	: dario tesis Ilumiquinga
Total Preheating	: 540.00 s	Material Lot	: Lot ABC
Measure Time	: 300.00 s	Material Supplier	: CEAST
Step Time	: 60.00 s	Material Form	: GRANULAT
MFR Expected	: 3.300 g/10min	Material Conditioning	: None
Swell step	: mm		
Comment :			
Operator : Dario LI		Compiler Name : CEAST Lab.	

Mean MFR A :	3.822 g/10min	Start Temperature :	230.0 °C
MFR A Std Dev :	1.220 g/10min	Start Position :	77.48 mm
MFR A Variance :	1.487	Start Time :	540.00 s
Mean MVR :	4.747 cm ³ /10min	Total time :	300.00 s
Velocity :	0.111 mm/s	Weight :	1.911 g
Shear Rate :	8.765 1/s	Density :	0.805 g/cm ³
Shear Stress :	19,360 Pa	Swell :	- %
Viscosity :	7,059.163 Pa*s		

5%-250 μ m

Test Procedure : CUSTOM TTT-ASTM			
Test Condition : ASTM D1238 L			
Temperature : 230.0 °C			
Nominal Load : 2.160 kg			
Die Length : 8.00 mm			
Die Diameter : 2.095 mm			
Preheating Without Load	: 300.00 s	Material Type	: dario tesis Ilumiquinga
Total Preheating	: 540.00 s	Material Lot	: Lot ABC
Measure Time	: 300.00 s	Material Supplier	: CEAST
Step Time	: 60.00 s	Material Form	: GRANULAT
MFR Expected	: 3.300 g/10min	Material Conditioning	: None
Swell step	: mm		
Comment :			
Operator : Dario LI		Compiler Name : CEAST Lab.	

Mean MFR A :	3.212 g/10min	Start Temperature :	230.0 °C
MFR A Std Dev :	1.433 g/10min	Start Position :	70.69 mm
MFR A Variance :	2.063	Start Time :	540.00 s
Mean MVR :	3.554 cm ³ /10min	Total time :	300.00 s
Velocity :	0.083 mm/s	Weight :	1.606 g
Shear Rate :	6.561 1/s	Density :	0.904 g/cm ³
Shear Stress :	19,360 Pa	Swell :	- %
Viscosity :	172,155.900 Pa*s		

5%-600µm

Test Procedure : CUSTOM TTT-ASTM
Test Condition : ASTM D1238 L
Temperature : 230.0 °C
Nominal Load : 2.160 kg
Die Length : 8.00 mm
Die Diameter : 2.095 mm

Preheating Without Load : 300.00 s
 Total Preheating : 540.00 s
 Measure Time : 300.00 s
 Step Time : 60.00 s
 MFR Expected : 3.300 g/10min
 Swell step : mm

Material Type : dario tesis llumiquina
 Material Lot : Lot ABC
 Material Supplier : CEAST
 Material Form : GRANULAT
 Material Conditioning : None

Comment :

Operator : Dario LI **Compiler Name** : CEAST Lab.

Mean MFR A :	3.814 g/10min	Start Temperature :	230.0 °C
MFR A Std Dev :	0.984 g/10min	Start Position :	76.54 mm
MFR A Variance :	0.968	Start Time :	540.00 s
Mean MVR :	4.738 cm ³ /10min	Total time :	300.00 s
Velocity :	0.111 mm/s	Weight :	1.907 g
Shear Rate :	8.747 1/s	Density :	0.805 g/cm ³
Shear Stress :	19,360 Pa		
Viscosity :	8,580.901 Pa*s	Swell :	- %

10%-250µm

Test Procedure : CUSTOM TTT-ASTM
Test Condition : ASTM D1238 L
Temperature : 230.0 °C
Nominal Load : 2.160 kg
Die Length : 8.00 mm
Die Diameter : 2.095 mm

Preheating Without Load : 300.00 s
 Total Preheating : 540.00 s
 Measure Time : 300.00 s
 Step Time : 60.00 s
 MFR Expected : 3.300 g/10min
 Swell step : mm

Material Type : dario tesis llumiquina
 Material Lot : Lot ABC
 Material Supplier : CEAST
 Material Form : GRANULAT
 Material Conditioning : None

Comment :

Operator : Dario llumiquina **Compiler Name** : CEAST Lab.

Mean MFR A :	3.808 g/10min	Start Temperature :	230.0 °C
MFR A Std Dev :	1.109 g/10min	Start Position :	84.57 mm
MFR A Variance :	1.231	Start Time :	540.00 s
Mean MVR :	4.179 cm ³ /10min	Total time :	300.00 s
Velocity :	0.098 mm/s	Weight :	1.803 g
Shear Rate :	7.716 1/s	Density :	0.863 g/cm ³
Shear Stress :	19,360 Pa		
Viscosity :	2,749.618 Pa*s	Swell :	- %

10%-600µm

Test Procedure : CUSTOM TTT-ASTM
Test Condition : ASTM D1238 L
Temperature : 230.0 °C
Nominal Load : 2.160 kg
Die Length : 8.00 mm
Die Diameter : 2.095 mm

Preheating Without Load : 300.00 s
 Total Preheating : 540.00 s
 Measure Time : 300.00 s
 Step Time : 60.00 s
 MFR Expected : 3.300 g/10min
 Swell step : mm

Material Type : dario tesis llumiyinga
 Material Lot : Lot ABC
 Material Supplier : CEAST
 Material Form : GRANULAT
 Material Conditioning : None

Comment :

Operator : Dario Llumiyinga **Compiler Name** : CEAST Lab.

Mean MFR A :	3.408 g/10min	Start Temperature :	230.0 °C
MFR A Std Dev :	1.478 g/10min	Start Position :	78.23 mm
MFR A Variance :	2.184	Start Time :	540.00 s
Mean MVR :	5.907 cm ³ /10min	Total time :	240.00 s
Velocity :	0.139 mm/s	Weight :	1.362 g
Shear Rate :	10.906 1/s	Density :	0.576 g/cm ³
Shear Stress :	19,360 Pa	Swell :	- %
Viscosity :	1,781.674 Pa*s		

15%-150µm

Test Procedure : CUSTOM TTT-ASTM
Test Condition : ASTM D1238 L
Temperature : 230.0 °C
Nominal Load : 2.160 kg
Die Length : 8.00 mm
Die Diameter : 2.095 mm

Preheating Without Load : 300.00 s
 Total Preheating : 540.00 s
 Measure Time : 300.00 s
 Step Time : 60.00 s
 MFR Expected : 3.300 g/10min
 Swell step : mm

Material Type : dario tesis llumiyinga
 Material Lot : Lot ABC
 Material Supplier : CEAST
 Material Form : GRANULAT
 Material Conditioning : None

Comment :

Operator : Dario LI **Compiler Name** : CEAST Lab.

Mean MFR A :	2.844 g/10min	Start Temperature :	229.9 °C
MFR A Std Dev :	0.798 g/10min	Start Position :	84.59 mm
MFR A Variance :	0.637	Start Time :	540.00 s
Mean MVR :	3.010 cm ³ /10min	Total time :	300.00 s
Velocity :	0.071 mm/s	Weight :	1.422 g
Shear Rate :	5.558 1/s	Density :	0.945 g/cm ³
Shear Stress :	19,360 Pa	Swell :	- %
Viscosity :	-10,628.120 Pa*s		

15%-250µm

Test Procedure : CUSTOM TTT-ASTM
Test Condition : ASTM D1238 L
Temperature : 230.0 °C
Nominal Load : 2.160 kg
Die Length : 8.00 mm
Die Diameter : 2.095 mm

Preheating Without Load : 300.00 s
Total Preheating : 540.00 s
Measure Time : 300.00 s
Step Time : 60.00 s
MFR Expected : 3.300 g/10min
Swell step : mm

Material Type : dario tesis llumiquinga
Material Lot : Lot ABC
Material Supplier : CEAST
Material Form : GRANULAT
Material Conditioning : None

Comment :

Operator : Dario LI **Compiler Name** : CEAST Lab.

Mean MFR A :	3.996 g/10min	Start Temperature :	230.1 °C
MFR A Std Dev :	0.367 g/10min	Start Position :	84.55 mm
MFR A Variance :	0.135	Start Time :	540.00 s
Mean MVR :	5.860 cm ³ /10min	Total time :	300.00 s
Velocity :	0.137 mm/s	Weight :	1.978 g
Shear Rate :	10.801 1/s	Density :	0.676 g/cm ³
Shear Stress :	19.360 Pa	Swell :	- %
Viscosity :	2.237.014 Pa*s		

15%-600µm

Test Procedure : CUSTOM TTT-ASTM
Test Condition : ASTM D1238 L
Temperature : 230.0 °C
Nominal Load : 2.160 kg
Die Length : 8.00 mm
Die Diameter : 2.095 mm

Preheating Without Load : 300.00 s
Total Preheating : 540.00 s
Measure Time : 300.00 s
Step Time : 60.00 s
MFR Expected : 3.300 g/10min
Swell step : mm

Material Type : dario tesis llumiquinga
Material Lot : Lot ABC
Material Supplier : CEAST
Material Form : GRANULAT
Material Conditioning : None

Comment :

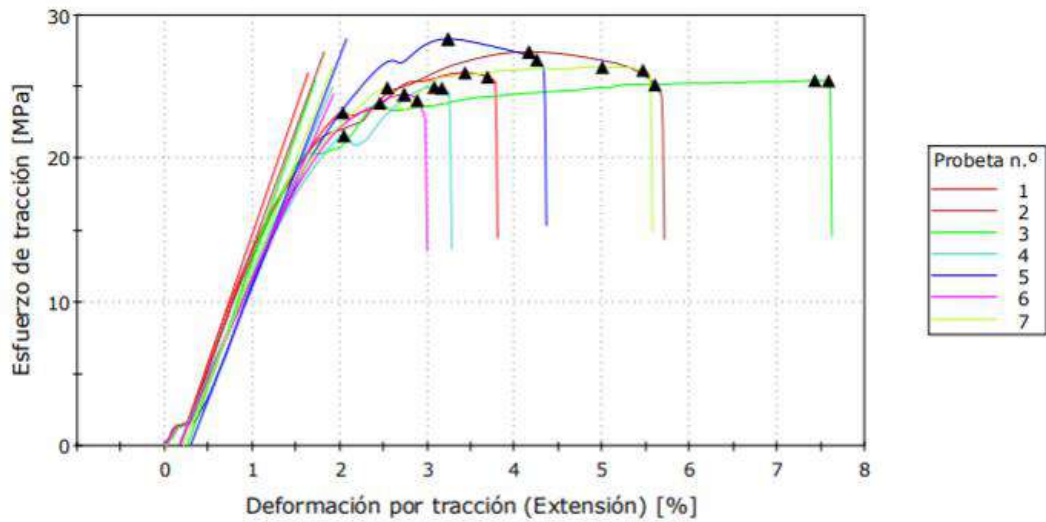
Operator : Dario LI **Compiler Name** : CEAST Lab.

Mean MFR A :	3.994 g/10min	Start Temperature :	230.0 °C
MFR A Std Dev :	0.128 g/10min	Start Position :	79.85 mm
MFR A Variance :	0.016	Start Time :	540.00 s
Mean MVR :	5.201 cm ³ /10min	Total time :	300.00 s
Velocity :	0.122 mm/s	Weight :	1.992 g
Shear Rate :	9.602 1/s	Density :	0.766 g/cm ³
Shear Stress :	19.360 Pa	Swell :	- %
Viscosity :	4.290.462 Pa*s		

Anexo VI. Resultados ensayo de tracción.

100%PP

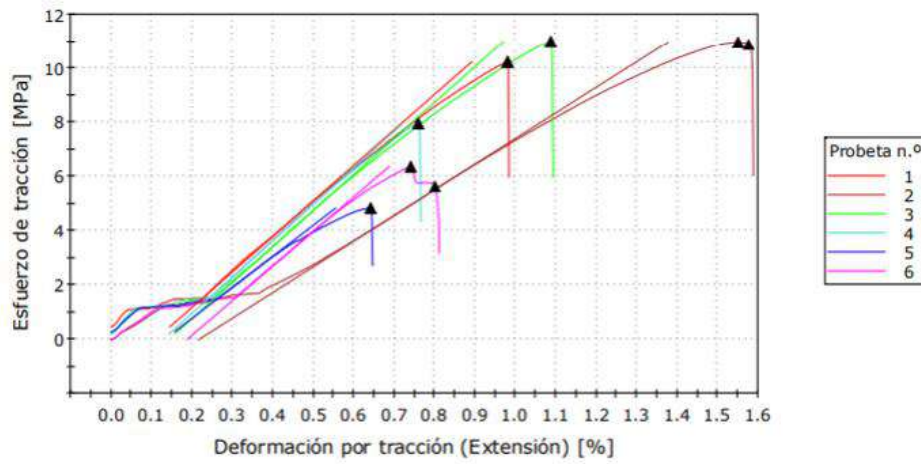
ASTM D 638-08: Stress-Strain Curve (Specimen 1 to 7)



	Tensile Strength [MPa]	Tensile Strength at Yield [MPa]	% Elongation at Yield [%]	Tensile Strength at Break [MPa]	% Elongation at Break [%]	Modulus [MPa]	Módulo (Secant 1) [%]	Anchura [mm]	Espesor [mm]
1	26,0	23,2	2,04	25,7	3,69	1760	1360	6,00	4,00
2	27,4	27,4	4,16	25,1	5,59	1660	1320	6,00	4,00
3	25,4	23,9	2,46	25,4	7,58	1740	1280	6,00	4,00
4	25,0	21,6	2,05	24,9	3,17	1410	1180	6,00	4,20
5	28,3	28,3	3,23	26,9	4,25	1590	1110	6,00	4,00
6	24,5	24,5	2,74	24,1	2,88	1380	1160	6,00	4,20
7	26,4	24,9	2,54	26,2	5,46	1540	1210	6,00	4,20
Media	26,1	24,8	2,74	25,5	4,66	1580	1230	6,00	4,09
S.D.	1,361	2,353	0,748	0,909	1,660	149	91,026	0,000	0,107

5%-150 μ m

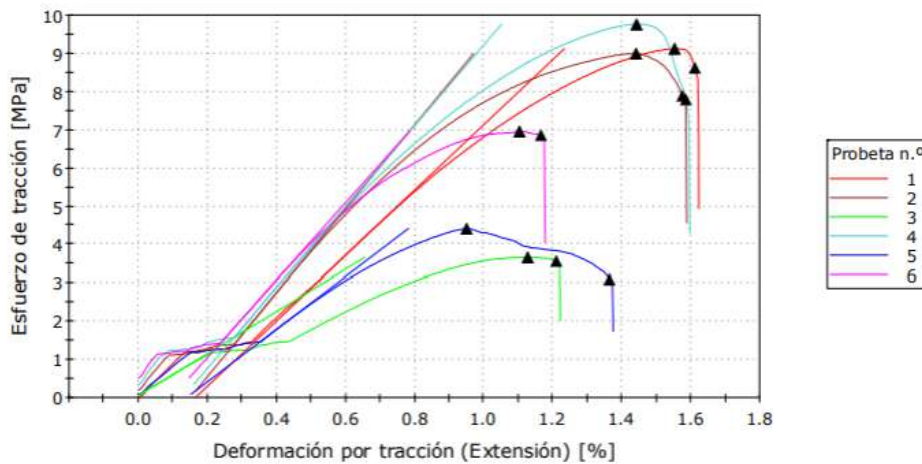
ASTM D 638-08: Stress-Strain Curve (Specimen 1 to 6)



	Tensile Strength [MPa]	Tensile Strength at Yield [MPa]	% Elongation at Yield [%]	Tensile Strength at Break [MPa]	% Elongation at Break [%]	Modulus [MPa]	Módulo al Modulus (Secant 1) (%) [MPa]	Anchura [mm]	Espesor [mm]
1	10,2	10,2	0,97968	10,2	0,97968	1310	-----	6,00	4,00
2	10,9	10,9	1,55	10,9	1,57	944	732	6,00	3,90
3	11,0	11,0	1,09	11,0	1,09	1330	1030	6,00	4,00
4	7,94	7,94	0,75895	7,94	0,75895	1340	-----	6,00	3,90
5	4,84	4,84	0,64138	4,84	0,64138	1140	-----	6,00	4,00
6	6,36	6,36	0,74016	5,63	0,80083	1270	-----	6,00	4,00
Media	8,55	8,55	0,95917	8,41	0,97358	1220	881	6,00	3,97
S.D.	2,582	2,582	0,333	2,705	0,335	153	210,514	0,000	0,052

5%-250 μ m

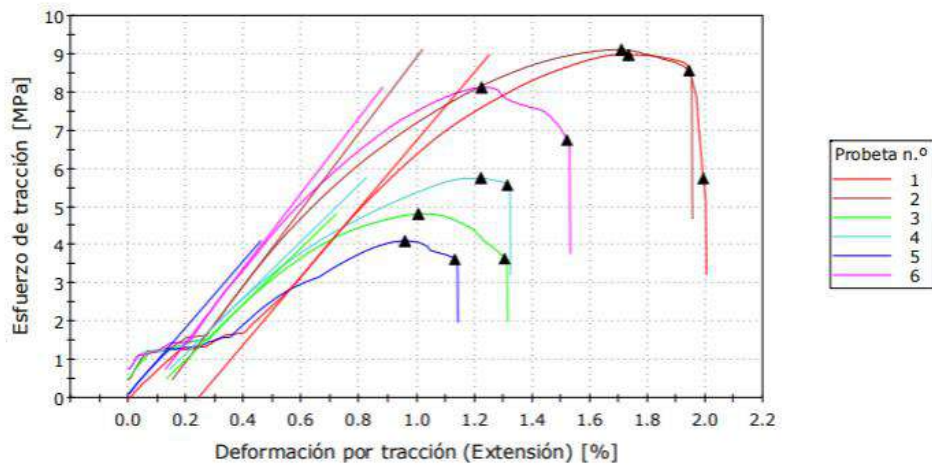
ASTM D 638-08: Stress-Strain Curve (Specimen 1 to 6)



	Tensile Strength [MPa]	Tensile Strength at Yield [MPa]	% Elongation at Yield [%]	Tensile Strength at Break [MPa]	% Elongation at Break [%]	Modulus [MPa]	Módulo al Modulus (Secant 1) (%) [MPa]	Anchura [mm]	Espesor [mm]
1	9,12	9,12	1,55	8,62	1,61	853	681	6,00	4,00
2	8,99	8,99	1,44	7,89	1,57	1090	772	6,00	4,20
3	3,67	3,67	1,13	3,58	1,21	549	358	6,00	4,00
4	9,76	9,76	1,44	7,79	1,58	1050	804	6,00	4,00
5	4,42	4,42	0,94990	3,11	1,36	687	431	6,00	4,00
6	6,95	6,95	1,10	6,86	1,16	1010	686	6,00	4,00
Media	7,15	7,15	1,27	6,31	1,42	874	622	6,00	4,03
S.D.	2,595	2,595	0,240	2,367	0,200	219	184,289	0,000	0,082

5%-600 μ m

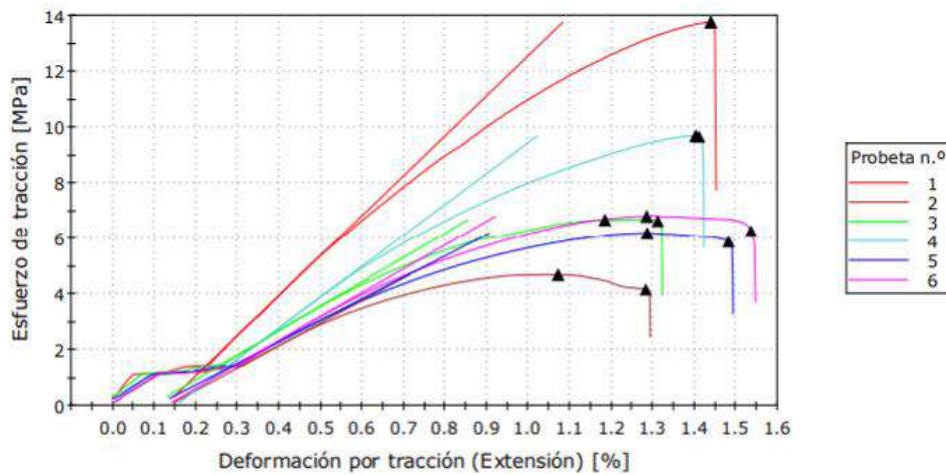
ASTM D 638-08: Stress-Strain Curve (Specimen 1 to 6)



	Tensile Strength [MPa]	Tensile Strength at Yield [MPa]	% Elongation at Yield [%]	Tensile Strength at Break [MPa]	% Elongation at Break [%]	Modulus [MPa]	MóduloalModulus (Secant 1) [%] [MPa]	Anchura [mm]	Espesor [mm]
1	8,97	8,97	1,73	5,75	1,99	888	638	6,00	4,10
2	9,11	9,11	1,71	8,56	1,94	996	720	6,00	4,10
3	4,83	4,83	1,00	3,66	1,30	732	482	6,00	4,10
4	5,76	5,76	1,22	5,58	1,31	734	538	6,00	4,10
5	4,12	4,12	0,95806	3,64	1,13	873	408	6,00	4,10
6	8,13	8,13	1,22	6,75	1,52	980	750	6,00	4,20
Media	6,82	6,82	1,31	5,66	1,53	867	590	6,00	4,12
S.D.	2,191	2,191	0,337	1,883	0,358	115	135,674	0,000	0,041

10%-150 μ m

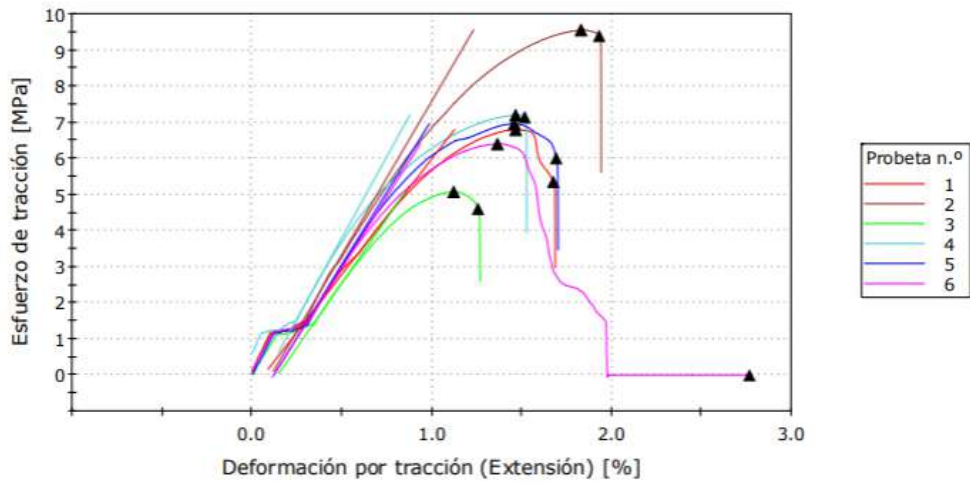
ASTM D 638-08: Stress-Strain Curve (Specimen 1 to 6)



	Tensile Strength [MPa]	Tensile Strength at Yield [MPa]	% Elongation at Yield [%]	Tensile Strength at Break [MPa]	% Elongation at Break [%]	Modulus [MPa]	MóduloalModulus (Secant 1) [%] [MPa]	Anchura [mm]	Espesor [mm]
1	13,7	13,7	1,44	13,7	1,44	1430	1100	6,00	4,10
2	4,70	4,70	1,07	4,17	1,28	807	469	6,00	4,20
3	6,68	6,68	1,18	6,64	1,31	875	629	6,00	4,10
4	9,69	9,69	1,40	9,66	1,41	1110	800	6,00	4,20
5	6,20	6,20	1,28	5,90	1,48	770	566	6,00	4,10
6	6,81	6,81	1,28	6,28	1,53	857	617	6,00	4,20
Media	7,97	7,97	1,28	7,73	1,41	975	697	6,00	4,15
S.D.	3,258	3,258	0,136	3,439	0,097	254	224,694	0,000	0,055

10%-250µm

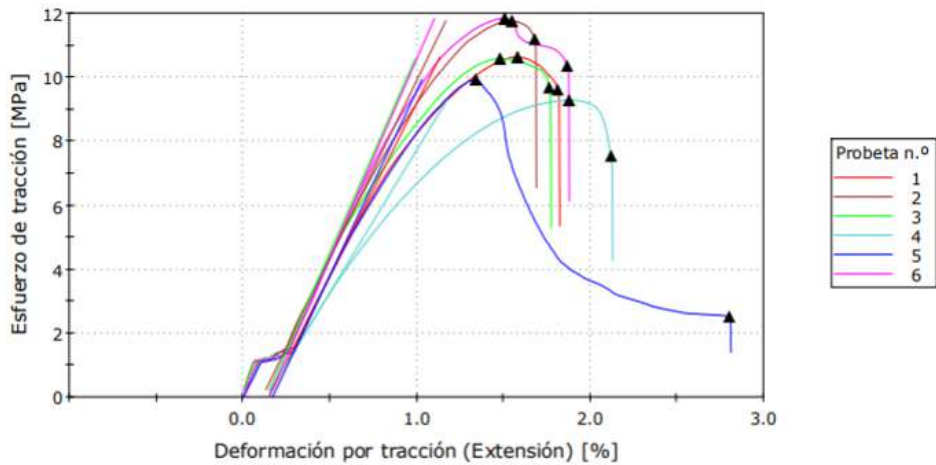
ASTM D 638-08: Stress-Strain Curve (Specimen 1 to 6)



	Tensile Strength [MPa]	Tensile Strength at Yield [MPa]	% Elongation at Yield [%]	Tensile Strength at Break [MPa]	% Elongation at Break [%]	Modulus [MPa]	Módulo al Modulus (Secant 1) [%]	Anchura [mm]	Espesor [mm]
1	6,79	6,79	1,46	5,36	1,67	637	568	6,00	4,00
2	9,54	9,54	1,83	9,39	1,93	848	685	6,00	4,00
3	5,08	5,08	1,12	4,62	1,26	715	494	6,00	4,00
4	7,19	7,19	1,46	7,14	1,51	898	628	6,00	3,90
5	6,95	6,95	1,46	6,01	1,69	805	609	6,00	4,00
6	6,40	6,40	1,36	0,02257	2,76	783	571	6,00	4,00
Media	6,99	6,99	1,45	5,42	1,80	781	592	6,00	3,98
S.D.	1,456	1,456	0,227	3,124	0,519	93,6	64,747	0,000	0,041

10%-600µm

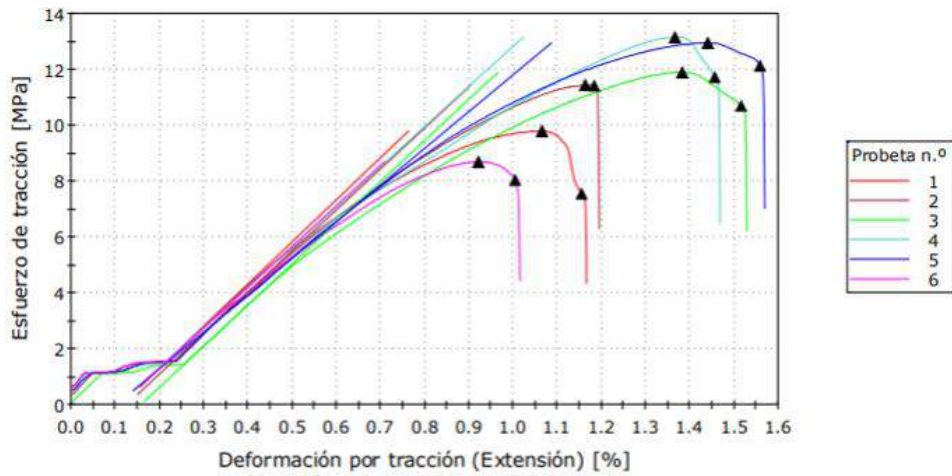
ASTM D 638-08: Stress-Strain Curve (Specimen 1 to 6)



	Tensile Strength [MPa]	Tensile Strength at Yield [MPa]	% Elongation at Yield [%]	Tensile Strength at Break [MPa]	% Elongation at Break [%]	Modulus [MPa]	Módulo al Modulus (Secant 1) [%]	Anchura [mm]	Espesor [mm]
1	10,6	10,6	1,58	9,62	1,81	1080	825	6,00	4,30
2	11,7	11,7	1,55	11,2	1,68	1110	919	6,00	4,10
3	10,6	10,6	1,48	9,69	1,76	1230	856	6,00	4,20
4	9,28	9,28	1,87	7,55	2,12	889	669	6,00	4,10
5	9,92	9,92	1,34	2,55	2,80	1150	827	6,00	4,20
6	11,8	11,8	1,51	10,4	1,86	1240	956	6,00	4,20
Media	10,7	10,7	1,55	8,49	2,00	1120	842	6,00	4,18
S.D.	1,001	1,001	0,177	3,152	0,416	129	99,627	0,000	0,075

15%-150µm

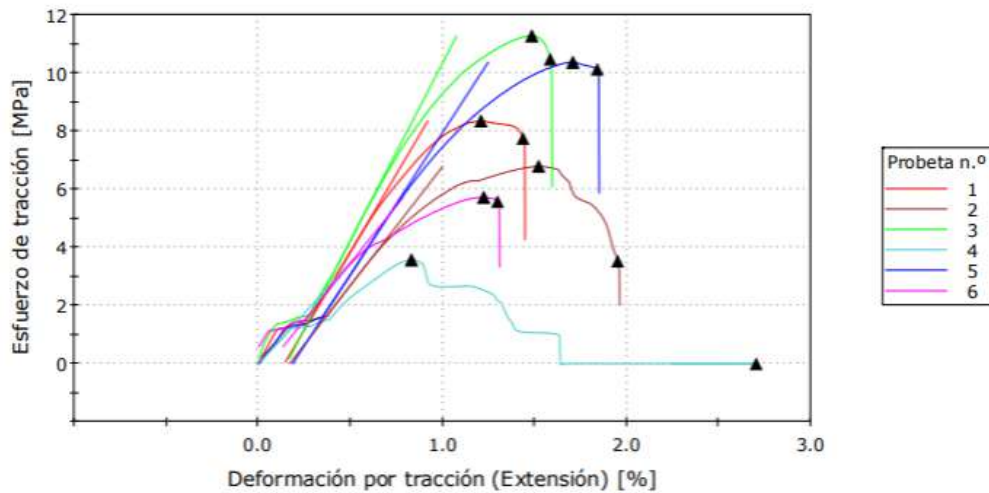
ASTM D 638-08: Stress-Strain Curve (Specimen 1 to 6)



	Tensile Strength [MPa]	Tensile Strength at Yield [MPa]	% Elongation at Yield [%]	Tensile Strength at Break [MPa]	% Elongation at Break [%]	Modulus [MPa]	MóduloalModulus (Secant 1) [%] [MPa]	Anchura [mm]	Espesor [mm]
1	9,80	9,80	1,06	7,57	1,15	1510	970	6,00	4,10
2	11,4	11,4	1,16	11,4	1,18	1470	1060	6,00	4,20
3	11,9	11,9	1,38	10,7	1,51	1470	993	6,00	4,20
4	13,1	13,1	1,36	11,7	1,45	1430	1070	6,00	4,10
5	12,9	12,9	1,44	12,1	1,56	1310	1080	6,00	4,20
6	8,69	8,69	0,92074	8,06	1,00	1450	815	6,00	4,20
Media	11,3	11,3	1,22	10,3	1,31	1440	999	6,00	4,17
S.D.	1,761	1,761	0,206	1,964	0,227	66,0	100,800	0,000	0,052

15%-250µm

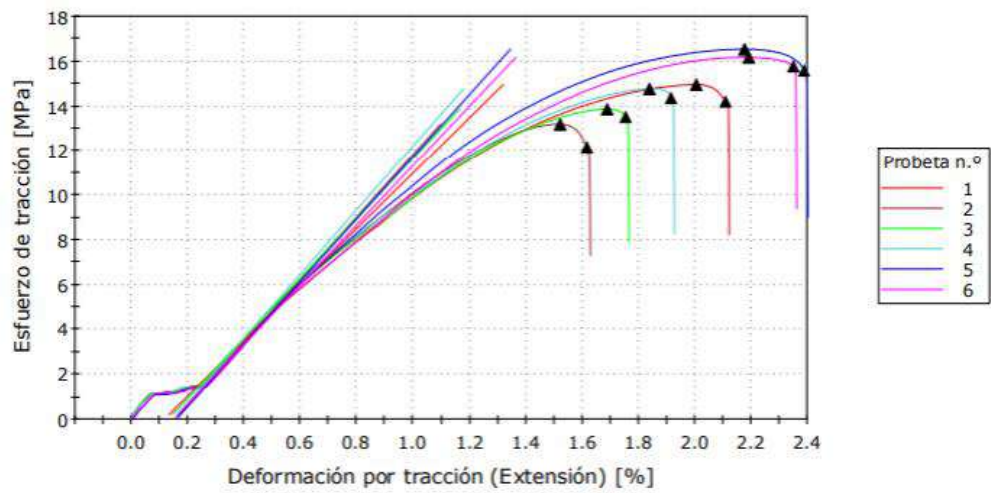
ASTM D 638-08: Stress-Strain Curve (Specimen 1 to 6)



	Tensile Strength [MPa]	Tensile Strength at Yield [MPa]	% Elongation at Yield [%]	Tensile Strength at Break [MPa]	% Elongation at Break [%]	Modulus [MPa]	MóduloalModulus (Secant 1) [%] [MPa]	Anchura [mm]	Espesor [mm]
1	8,33	8,33	1,21	7,74	1,43	1070	782	6,00	4,00
2	6,79	6,79	1,52	3,53	1,95	817	583	6,00	3,90
3	11,3	11,3	1,48	10,5	1,58	1220	928	6,00	4,00
4	3,57	3,57	0,83023	0,01629	2,70	698	265	6,00	4,00
5	10,4	10,4	1,71	10,1	1,84	976	744	6,00	3,90
6	5,72	5,72	1,22	5,58	1,30	787	534	6,00	4,00
Media	7,67	7,67	1,33	6,24	1,80	929	639	6,00	3,97
S.D.	2,895	2,895	0,309	4,040	0,502	197	231,947	0,000	0,052

15%-600 μ m

ASTM D 638-08: Stress-Strain Curve (Specimen 1 to 6)



	Tensile Strength [MPa]	Tensile Strength at Yield [MPa]	% Elongation at Yield [%]	Tensile Strength at Break [MPa]	% Elongation at Break [%]	Modulus [MPa]	MóduloalModulus (Secant 1%) [MPa]	Anchura [mm]	Espesor [mm]
1	15,0	15,0	2,00	14,2	2,11	1240	989	6,00	4,10
2	13,2	13,2	1,52	12,2	1,62	1400	1010	6,00	4,30
3	13,9	13,9	1,69	13,5	1,75	1340	990	6,00	4,30
4	14,8	14,8	1,84	14,4	1,91	1430	1000	6,00	4,20
5	16,5	16,5	2,17	15,6	2,39	1390	1040	6,00	4,20
6	16,2	16,2	2,19	15,8	2,35	1330	1010	6,00	4,20
Media	14,9	14,9	1,90	14,3	2,02	1350	1010	6,00	4,22
S.D.	1,287	1,287	0,269	1,341	0,314	67,8	20,517	0,000	0,075

Anexo VII. Resultados ensayo de flexión.

100%PP

Descripción del método

ASTM D 790-10 Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials

Gráfico 1

Flexure Stress vs. Flexure Strain

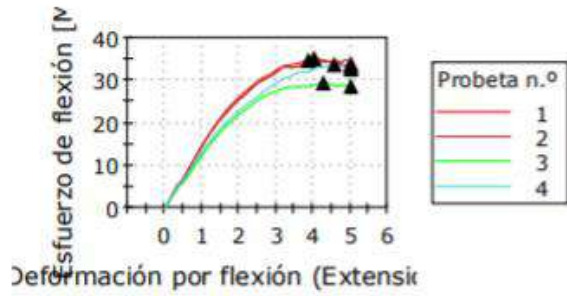


Tabla de resultados 1

	Anchura [mm]	Depth [mm]	Flexural Strength [MPa]	Flexural Stress at Break [MPa]	Stress at 5% Strain [MPa]	Flexural Strain [%]	Tangent Modulus (1%) [MPa]	Secant Modulus (1%) [MPa]	Chord Modulus (0.5% - 1.0%) [MPa]	Flexural Offset Yield Strength (0.2%) [MPa]
1	10,0	4,00	34,8	33,3	33,3	3,86	-5750	1460	1530	27,3
2	10,0	4,00	35,2	33,9	33,9	4,01	-2170	1450	1510	23,3
3	10,0	4,00	29,5	28,7	28,7	4,26	2460	1230	1230	28,4
4	10,0	4,00	33,7	32,7	32,7	4,55	3330	1310	1310	30,4
Media	10,0	4,00	33,3	32,2	32,1	4,17	-532	1360	1390	27,4
S.D.	0,00	0,00	2,60	2,36	2,36	0,30	4231,54	111,93	150,29	3,02

	Specimen behavior
1	Yield
2	Yield
3	Yield
4	Yield
Media	
S.D.	

5%-150µm

Descripción del método

ASTM D 790-10 Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials

Gráfico 1

Flexure Stress vs. Flexure Strain

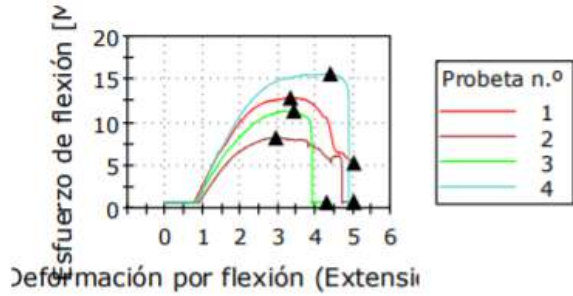


Tabla de resultados 1

	Anchura [mm]	Depth [mm]	Flexural Strength [MPa]	Flexural Stress at Break [MPa]	Stress at 5% Strain [MPa]	Flexural Strain [%]	Tangent Modulus (1%) [MPa]	Secant Modulus (1%) [MPa]	Chord Modulus (0.5% - 1.0%) [MPa]	Flexural Offset Yield Strength (0.2%) [MPa]
1	10,0	4,00	12,9	5,40	5,39	3,32	-3560	294	430	11,2
2	10,0	4,00	8,31	0,90816	0,90797	2,93	-2790	153	141	7,43
3	10,0	4,00	11,4	0,85427	-----	3,40	2870	230	294	11,0
4	10,0	4,00	15,7	0,88987	-----	4,37	2910	246	323	14,8
Media	10,0	4,00	12,1	2,01	3,15	3,50	-142	231	297	11,1
S.D.	0,00	0,00	3,08	2,26	3,17	0,61	3515,40	58,71	119,31	3,03

	Specimen behavior
1	Yield
2	Yield
3	Yield
4	Yield
Media	
S.D.	

5%-250µm

Descripción del método

ASTM D 790-10 Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials

Gráfico 1

Flexure Stress vs. Flexure Strain

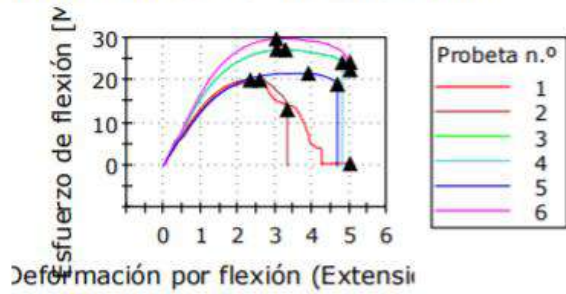


Tabla de resultados 1

	Anchura [mm]	Depth [mm]	Flexural Strength [MPa]	Flexural Stress at Break [MPa]	Stress at 5% Strain [MPa]	Flexural Strain [%]	Tangent Modulus (1%) [MPa]	Secant Modulus (1%) [MPa]	Chord Modulus (0.5% - 1.0%) [MPa]	Flexural Offset Yield Strength (0.2%) [MPa]
1	10,0	4,00	20,1	0,55702	0,54671	2,33	503	1340	1270	12,6
2	10,0	4,00	20,1	13,2	-----	2,58	-1740	1270	1220	18,5
3	10,0	4,00	27,2	24,2	24,2	3,04	1980	1580	1570	26,9
4	10,0	4,00	27,2	24,2	-----	3,26	-616	1560	1540	16,6
5	10,0	4,00	21,7	19,1	-----	3,88	862	1260	1170	21,2
6	10,0	4,00	29,7	22,5	22,4	3,02	3610	1690	1720	29,7
Media	10,0	4,00	24,3	17,3	15,7	3,02	767	1450	1420	20,9
S.D.	0,00	0,00	4,21	9,20	13,18	0,54	1886,00	183,18	222,71	6,43

	Specimen behavior
1	Yield
2	Yield
3	Yield
4	Yield
5	Yield
6	Yield
Media	
S.D.	

5%-600µm

Flexure Stress vs. Flexure Strain

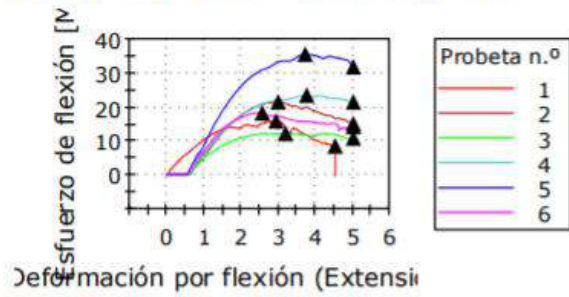


Tabla de resultados 1

	Anchura [mm]	Depth [mm]	Flexural Strength [MPa]	Flexural Stress at Break [MPa]	Stress at 5% Strain [MPa]	Flexural Strain [%]	Tangent Modulus (1%) [MPa]	Secant Modulus (1%) [MPa]	Chord Modulus (0.5% - 1.0%) [MPa]	Flexural Offset Yield Strength (0.2%) [MPa]
1	10,0	4,00	16,0	8,73	-----	2,93	-952	1050	918	14,0
2	10,0	4,00	21,7	15,4	15,4	2,98	-1480	611	1180	13,8
3	10,0	4,00	12,4	11,0	11,0	3,18	-1060	515	960	9,54
4	10,0	4,00	23,7	21,7	21,7	3,75	-9990	648	1200	19,7
5	10,0	4,00	35,5	31,9	31,9	3,71	-5540	892	1680	26,6
6	10,0	4,00	18,5	14,5	14,4	2,56	759	725	1330	15,3
Media	10,0	4,00	21,3	17,2	18,9	3,19	-3040	741	1210	16,5
S.D.	0,00	0,00	8,03	8,46	8,24	0,46	3990,93	198,44	275,22	5,94

	Specimen behavior
1	Yield
2	Yield
3	Yield
4	Yield
5	Yield
6	Yield
Media	
S.D.	

10%-150µm

Flexure Stress vs. Flexure Strain

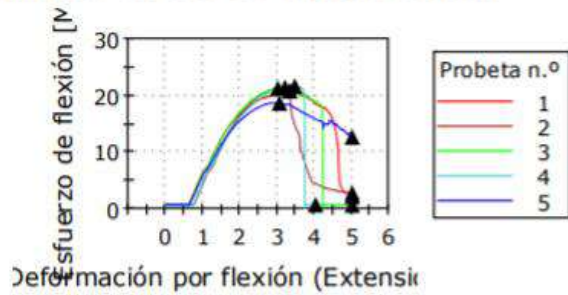


Tabla de resultados 1

	Anchura [mm]	Depth [mm]	Flexural Strength [MPa]	Flexural Stress at Break [MPa]	Stress at 5% Strain [MPa]	Flexural Strain [%]	Tangent Modulus (1%) [MPa]	Secant Modulus (1%) [MPa]	Chord Modulus (0.5% - 1.0%) [MPa]	Flexural Offset Yield Strength (0.2%) [MPa]
1	10,0	4,00	20,9	2,42	2,42	3,33	-329	649	1120	5,94
2	10,0	4,00	21,5	3,01	2,98	3,20	324	449	722	5,36
3	10,0	4,00	21,3	0,92767	0,91129	3,01	-480	635	1090	7,51
4	10,0	4,00	21,7	0,94540	-----	3,46	4100	470	758	21,0
5	10,0	4,00	18,7	12,8	12,8	3,05	-575	594	1010	8,21
Media	10,0	4,00	20,8	4,01	4,76	3,21	608	559	940	9,61
S.D.	0,00	0,00	1,20	4,98	5,40	0,19	1983,52	93,86	188,11	6,48

	Specimen behavior
1	Yield
2	Yield
3	Yield
4	Yield
5	Yield
Media	
S.D.	

10%-250µm

Flexure Stress vs. Flexure Strain

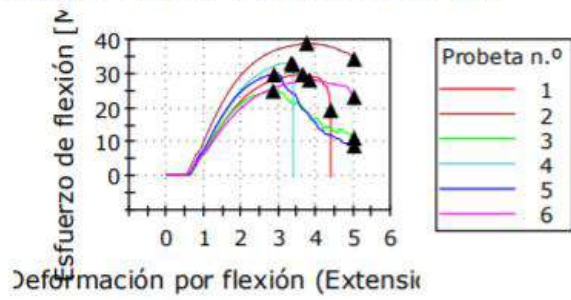


Tabla de resultados 1

	Anchura [mm]	Depth [mm]	Flexural Strength [MPa]	Flexural Stress at Break [MPa]	Stress at 5% Strain [MPa]	Flexural Strain [%]	Tangent Modulus (1%) [MPa]	Secant Modulus (1%) [MPa]	Chord Modulus (0.5% - 1.0%) [MPa]	Flexural Offset Yield Strength (0.2%) [MPa]
1	10,0	4,00	29,9	19,4	-----	3,62	42,2	689	1250	1,41
2	10,0	4,00	38,9	34,3	34,3	3,74	5570	1040	1940	37,7
3	10,0	4,00	25,1	11,3	11,3	2,84	-3840	677	1210	21,2
4	10,0	4,00	33,1	32,7	-----	3,33	646	753	1350	6,42
5	10,0	4,00	29,8	9,08	9,07	2,87	1010	784	1410	15,7
6	10,0	4,00	28,2	23,3	23,3	3,81	977	681	1200	24,4
Media	10,0	4,00	30,8	21,7	19,5	3,37	733	770	1390	17,8
S.D.	0,00	0,00	4,73	10,53	11,69	0,43	2997,42	138,14	279,65	13,1

	Specimen behavior
1	Yield
2	Yield
3	Yield
4	Yield
5	Yield
6	Yield
Media	
S.D.	

10%-600µm

Flexure Stress vs. Flexure Strain

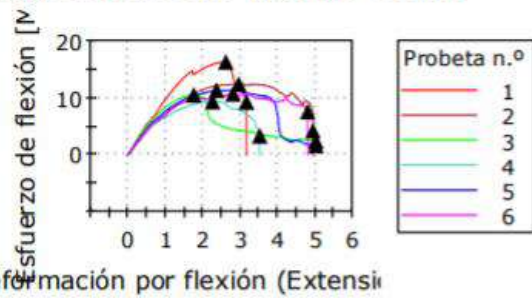


Tabla de resultados 1

	Anchura [mm]	Depth [mm]	Flexural Strength [MPa]	Flexural Stress at Break [MPa]	Stress at 5% Strain [MPa]	Flexural Strain [%]	Tangent Modulus (1%) [MPa]	Secant Modulus (1%) [MPa]	Chord Modulus (0.5% - 1.0%) [MPa]	Flexural Offset Yield Strength (0.2%) [MPa]
1	10,0	4,00	16,3	9,30	-----	2,60	-2160	973	863	15,3
2	10,0	4,00	12,4	4,32	-----	2,94	2540	710	603	12,4
3	10,0	4,00	10,6	2,50	2,50	1,75	3730	838	647	5,02
4	10,0	4,00	9,40	3,40	-----	2,25	4480	661	475	8,87
5	10,0	4,00	11,3	1,75	1,73	2,36	-3840	771	616	11,3
6	10,0	4,00	10,7	7,65	-----	2,79	3670	722	550	10,6
Media	10,0	4,00	11,8	4,82	2,11	2,45	1400	779	626	10,6
S.D.	0,00	0,00	2,41	3,01	0,54	0,43	3506,23	112,54	130,83	3,45

	Specimen behavior
1	Yield
2	Yield
3	Yield
4	Yield
5	Yield
6	Yield
Media	
S.D.	

15%-150µm

Flexure Stress vs. Flexure Strain

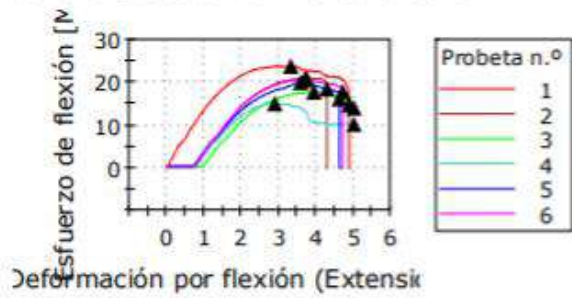


Tabla de resultados 1

	Anchura [mm]	Depth [mm]	Flexural Strength [MPa]	Flexural Stress at Break [MPa]	Stress at 5% Strain [MPa]	Flexural Strain [%]	Tangent Modulus (1%) [MPa]	Secant Modulus (1%) [MPa]	Chord Modulus (0.5% - 1.0%) [MPa]	Flexural Offset Yield Strength (0.2%) [MPa]
1	10,0	4,00	23,8	14,9	-----	3,31	1730	1360	1340	23,6
2	10,0	4,00	21,0	18,5	-----	3,73	769	344	647	13,9
3	10,0	4,00	17,8	14,1	14,1	3,93	459	67,6	71,3	-----
4	10,0	4,00	15,1	10,3	10,3	2,89	4280	300	520	15,1
5	10,0	4,00	20,0	16,3	-----	3,58	547	387	675	12,0
6	10,0	4,00	20,6	17,9	-----	3,68	615	372	640	14,0
Media	10,0	4,00	19,7	15,3	12,2	3,52	1400	471	648	15,7
S.D.	0,00	0,00	2,95	2,99	2,72	0,37	1486,34	449,46	405,68	4,55

	Specimen behavior
1	Yield
2	Yield
3	Yield
4	Yield
5	Yield
6	Yield
Media	
S.D.	

15%-250µm

Flexure Stress vs. Flexure Strain

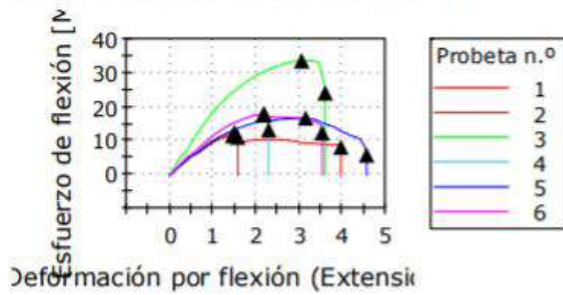


Tabla de resultados 1

	Anchura [mm]	Depth [mm]	Flexural Strength [MPa]	Flexural Stress at Break [MPa]	Stress at 5% Strain [MPa]	Flexural Strain [%]	Tangent Modulus (1%) [MPa]	Secant Modulus (1%) [MPa]	Chord Modulus (0.5% - 1.0%) [MPa]	Flexural Offset Yield Strength (0.2%) [MPa]
1	10,0	4,00	11,7	8,26	-----	1,46	-3150	955	817	10,3
2	10,0	4,00	12,5	11,1	-----	1,50	-1710	1020	866	-----
3	10,0	4,00	33,5	24,1	-----	3,04	1490	1840	1830	25,3
4	10,0	4,00	17,7	13,3	-----	2,16	1030	1130	1080	3,65
5	10,0	4,00	16,7	5,93	-----	3,13	2410	974	850	16,7
6	10,0	4,00	18,0	12,4	-----	2,18	447	1160	1110	10,6
Media	10,0	4,00	18,4	12,5	-----	2,24	84,9	1180	1090	13,3
S.D.	0,00	0,00	7,90	6,31	-----	0,72	2099,88	333,02	380,32	8,15

	Specimen behavior
1	Yield
2	Yield
3	Yield
4	Yield
5	Yield
6	Yield
Media	
S.D.	

15%-600µm

Flexure Stress vs. Flexure Strain

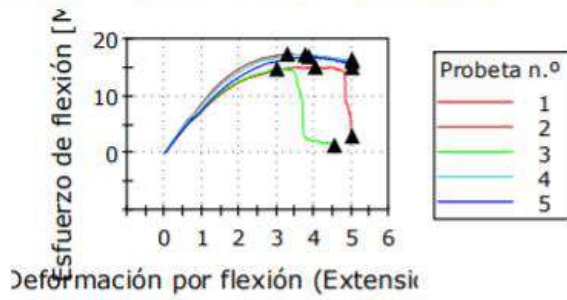


Tabla de resultados 1

	Anchura [mm]	Depth [mm]	Flexural Strength [MPa]	Flexural Stress at Break [MPa]	Stress at 5% Strain [MPa]	Flexural Strain [%]	Tangent Modulus (1%) [MPa]	Secant Modulus (1%) [MPa]	Chord Modulus (0.5% - 1.0%) [MPa]	Flexural Offset Yield Strength (0.2%) [MPa]
1	10,0	4,00	15,1	3,05	3,05	4,02	4220	736	656	14,1
2	10,0	4,00	17,4	15,0	15,0	3,28	2580	879	802	17,0
3	10,0	4,00	14,8	1,50	-----	2,99	166	753	661	6,18
4	10,0	4,00	17,2	16,4	16,4	3,75	1930	845	756	16,9
5	10,0	4,00	16,9	16,1	16,1	3,85	-1270	764	690	12,6
Media	10,0	4,00	16,3	10,4	12,6	3,58	1520	795	713	13,4
S.D.	0,00	0,00	1,23	7,47	6,42	0,43	2133,07	62,71	63,76	4,43

	Specimen behavior
1	Yield
2	Yield
3	Yield
4	Yield
5	Yield
Media	
S.D.	

Anexo VIII. Resultados ensayo de impacto.

Condiciones:

Id. Muestra	Fecha	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	Humedad inicial (% HR)	Humedad final (% HR)
100% PP MI-20-0152 a MI-20-0157	14/02/2020	22,1	22,3	46,4	45,6
150μ 5% MI-20-0158 a MI-20-0163	14/02/2020	22,5	22,3	42,8	40,8
250μ 5% MI-20-0164 a MI-20-0169	17/02/2020	21,4	21,7	36,3	36,1
600μ 5% MI-20-0170 a MI-20-0175	19/02/2020	21,2	21,4	41,5	41,4
150μ 10% MI-20-0176 a MI-20-0181	14/02/2020	21,3	21,4	45,8	45,9
250μ 10% MI-20-0182 a MI-20-0187	17/02/2020	21,9	22,1	34,7	34,8
600μ 10% MI-20-0188 a MI-20-0193	14/02/2020	21,3	21,6	48,2	48,2
150μ 15% MI-20-0194 a MI-20-0199	14/02/2020	21,6	21,8	48,4	45,3
250μ 15% MI-20-0200 a MI-20-0205	19/02/2020	21,4	21,5	41,5	41,7
600μ 15% MI-20-0212 a MI-20-0217	14/02/2020	21,8	22,0	47,8	47,6

100%PP

100% PP								
Muestra No.	Ancho (mm)	Profundidad (mm)	Probeta (ASTM D256-10)	Tipo de Falla	Energía de impacto (J)	Energía / longitud (J/m)	Energía / área (kJ/m ²)	
100% PP-1 MI-20-0152	6,24	13,29	E (sin muesca)	Rotura completa	0,8230	131,892	9,92417	
100% PP-2 MI-20-0153	6,17	13,47		Rotura completa	0,6558	106,300	7,89162	
100% PP-3 MI-20-0154	6,30	13,72		Rotura completa	0,8962	142,258	10,3687	
100% PP-4 MI-20-0155	6,26	13,57		Rotura completa	0,8310	132,763	9,78357	
100% PP-5 MI-20-0156	6,32	13,63		Rotura completa	1,0634	168,272	12,3457	
100% PP-6 MI-20-0157	6,36	13,45		Rotura completa	0,9314	146,447	10,8882	
Promedio						0,8668	137,989	10,2003
Desviación estándar					S_{n-1}	0,1352	20,374	1,4618
Coeficiente de variación					CV	15,5989	14,765	14,3309

5%-150 μ m

5%-150 μ m								
Muestra No.	Ancho (mm)	Profundidad (mm)	Probeta (ASTM D256-10)	Tipo de Falla	Energía de impacto (J)	Energía / longitud (J/m)	Energía / área (kJ/m ²)	
150 μ 5%-1 MI-20-0158	9,66	13,58	E (sin muesca)	Rotura completa	0,1255	12,9980	0,95714	
150 μ 5%-2 MI-20-0159	9,69	13,73		Rotura completa	0,1564	16,1441	1,17583	
150 μ 5%-3 MI-20-0160	9,78	13,48		Rotura completa	0,2398	24,5223	1,81916	
150 μ 5%-4 MI-20-0161	9,54	13,53		Rotura completa	0,1235	12,9463	0,9569	
150 μ 5%-5 MI-20-0162	9,93	13,44		Rotura completa	0,1555	15,6686	1,16582	
150 μ 5%-6 MI-20-0163	9,53	13,50		Rotura completa	0,2119	22,2437	1,64768	
Promedio						0,1688	17,4205	1,28708
Desviación estándar					S_{n-1}	0,0472	4,8575	0,36280
Coeficiente de variación					CV	27,9890	27,8835	28,18798

5%-250 μ m

5%-250 μ m								
Muestra No.	Ancho (mm)	Profundidad (mm)	Probeta (ASTM D256-10)	Tipo de Falla	Energía de impacto (J)	Energía / longitud (J/m)	Energía / área (kJ/m ²)	
250 μ 5%-1 MI-20-0164	9,49	13,45	E (sin muesca)	Rotura completa	0,3836	40,4224	3,00538	
250 μ 5%-2 MI-20-0165	9,15	13,52		Rotura completa	0,2452	26,8073	1,98279	
250 μ 5%-3 MI-20-0166	9,36	13,66		Rotura completa	0,3254	34,7654	2,54505	
250 μ 5%-4 MI-20-0167	9,37	13,40		Rotura completa	0,2018	21,5375	1,60728	
250 μ 5%-5 MI-20-0168	9,35	13,67		Rotura completa	0,8137	87,0352	6,36687	
250 μ 5%-6 MI-20-0169	9,37	13,70		Rotura completa	0,3945	42,1107	3,07377	
Promedio						0,3940	42,1131	3,09686
Desviación estándar					S_{n-1}	0,2191	23,3772	1,70096
Coeficiente de variación					CV	55,6068	55,5105	54,92544

5%-600 μ m

5%-600 μ m								
Muestra No.	Ancho (mm)	Profundidad (mm)	Probeta (ASTM D256-10)	Tipo de Falla	Energía de impacto (J)	Energía / longitud (J/m)	Energía / área (kJ/m ²)	
600 μ 5%-1 MI-20-0170	7,40	13,57	E (sin muesca)	Rotura completa	0,2035	27,5095	2,02723	
600 μ 5%-2 MI-20-0171	7,55	13,31		Rotura completa	0,2150	28,4896	2,14046	
600 μ 5%-3 MI-20-0172	7,44	13,54		Rotura completa	0,1496	20,1186	1,48586	
600 μ 5%-4 MI-20-0173	7,23	13,37		Rotura completa	0,1679	23,2269	1,73724	
600 μ 5%-5 MI-20-0174	7,47	13,5		Rotura completa	0,1429	19,1394	1,41773	
600 μ 5%-5 MI-20-0175	7,73	13,62		Rotura completa	0,2213	28,6348	2,10241	
Promedio						0,1834	24,5198	1,81849
Desviación estándar					S_{n-1}	0,0342	4,2807	0,31803
Coeficiente de variación					CV	18,6730	17,4581	17,48844

10%-150 μ m

10%-150 μ m								
Muestra No.	Ancho (mm)	Profundidad (mm)	Probeta (ASTM D256-10)	Tipo de Falla	Energía de impacto (J)	Energía / longitud (J/m)	Energía / área (kJ/m ²)	
150 μ 10%-1 MI-20-0176	7,69	13,58	E (sin muesca)	Rotura completa	0,1851	24,0805	1,77323	
150 μ 10%-2 MI-20-0177	7,48	13,50		Rotura completa	0,1594	21,3108	1,57858	
150 μ 10%-3 MI-20-0178	7,76	13,47		Rotura completa	0,1730	22,3038	1,65581	
150 μ 10%-4 MI-20-0179	7,39	13,04		Rotura completa	0,1657	22,4348	1,72046	
150 μ 10%-5 MI-20-0180	7,86	13,38		Rotura completa	0,4467	56,8391	4,24806	
150 μ 10%-6 MI-20-0181	7,67	13,55		Rotura completa	0,1791	23,3524	1,72342	
Promedio						0,2182	28,3869	2,11659
Desviación estándar					S_{n-1}	0,1123	13,9708	1,04636
Coeficiente de variación					CV	51,4895	49,2158	49,43599

10%-250 μ m

10%-250 μ m								
Muestra No.	Ancho (mm)	Profundidad (mm)	Probeta (ASTM D256-10)	Tipo de Falla	Energía de impacto (J)	Energía / longitud (J/m)	Energía / área (kJ/m ²)	
250 μ 10%-1 MI-20-0182	9,54	13,32	E (sin muesca)	Rotura completa	0,1717	18,0072	1,35189	
250 μ 10%-2 MI-20-0183	9,35	13,72		Rotura completa	0,1978	21,1602	1,54229	
250 μ 10%-3 MI-20-0184	9,11	13,41		Rotura completa	0,1120	12,3044	0,91755	
250 μ 10%-4 MI-20-0185	9,12	13,64		Rotura completa	0,1092	11,9803	0,87832	
250 μ 10%-5 MI-20-0186	9,27	13,58		Rotura completa	0,1321	14,2565	1,04982	
250 μ 10%-6 MI-20-0187	9,17	13,50		Rotura completa	0,2249	24,5292	1,81697	
Promedio						0,1580	17,0396	1,25947
Desviación estándar					S_{n-1}	0,0478	5,0946	0,37563
Coeficiente de variación					CV	30,2513	29,8984	29,82401

10%-600 μ m

10%-600 μ m								
Muestra No.	Ancho (mm)	Profundidad (mm)	Probeta (ASTM D256-10)	Tipo de Falla	Energía de impacto (J)	Energía / longitud (J/m)	Energía / área (kJ/m ²)	
600 μ 10%-1 MI-20-0188	7,09	13,72	E (sin muesca)	Rotura completa	0,1292	18,2322	1,32888	
600 μ 10%-2 MI-20-0189	6,96	13,63		Rotura completa	0,1145	16,4551	1,20727	
600 μ 10%-3 MI-20-0190	6,97	13,49		Rotura completa	0,1991	28,5747	2,11821	
600 μ 10%-4 MI-20-0191	6,91	13,56		Rotura completa	0,1367	19,7856	1,45912	
600 μ 10%-5 MI-20-0192	6,91	13,70		Rotura completa	0,1145	16,5742	1,20979	
600 μ 10%-6 MI-20-0193	7,01	13,32		Rotura completa	0,1169	16,6860	1,25270	
Promedio						0,135	19,38	1,429
Desviación estándar					S_{n-1}	0,033	4,68	0,350
Coeficiente de variación					CV	24,120	24,16	24,522

15%-150 μ m

15%-150 μ m								
Muestra No.	Ancho (mm)	Profundidad (mm)	Probeta (ASTM D256-10)	Tipo de Falla	Energía de impacto (J)	Energía / longitud (J/m)	Energía / área (kJ/m ²)	
150 μ 15%-1 MI-20-0194	8,97	13,63	E (sin muesca)	Rotura completa	0,5123	57,1167	4,19051	
150 μ 15%-2 MI-20-0195	8,89	13,71		Rotura completa	0,2439	27,4376	2,00128	
150 μ 15%-3 MI-20-0196	8,94	13,40		Rotura completa	0,1864	20,8594	1,55667	
150 μ 15%-4 MI-20-0197	8,96	13,46		Rotura completa	0,2088	23,3121	1,73196	
150 μ 15%-5 MI-20-0198	8,95	13,36		Rotura completa	0,2916	32,5831	2,43885	
150 μ 15%-6 MI-20-0199	8,96	13,60		Rotura completa	0,1683	18,7900	1,38162	
Promedio						0,2686	30,0165	2,21682
Desviación estándar					S_{n-1}	0,1272	14,1598	1,03534
Coeficiente de variación					CV	47,3721	47,1733	46,70398

15%-250 μ m

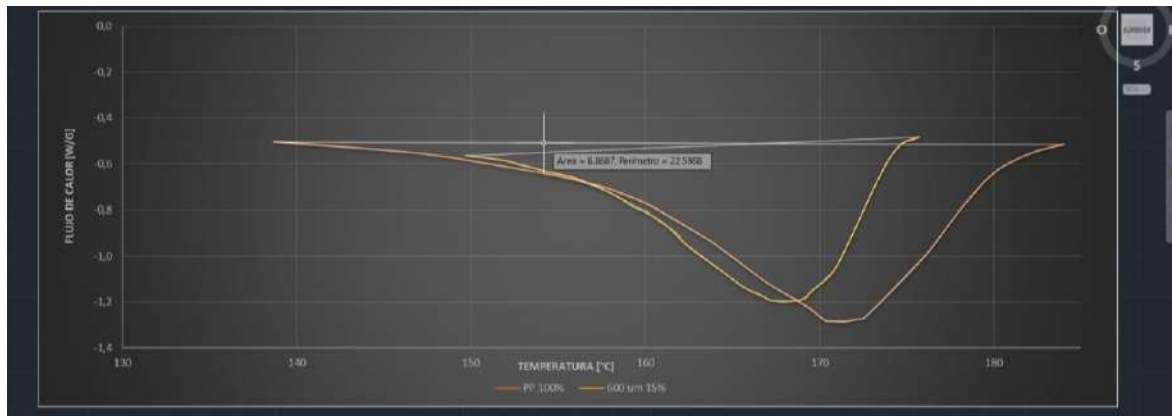
15%-250 μ m								
Muestra No.	Ancho (mm)	Profundidad (mm)	Probeta (ASTM D256-10)	Tipo de Falla	Energía de impacto (J)	Energía / longitud (J/m)	Energía / área (kJ/m ²)	
250 μ 15%-1 MI-20-0206	8,76	13,72	E (sin muesca)	Rotura completa	0,1760	20,1017	1,46514	
250 μ 15%-2 MI-20-0207	8,74	13,52		Rotura completa	0,3020	34,5549	2,55584	
250 μ 15%-3 MI-20-0208	8,79	13,56		Rotura completa	0,3821	43,4719	3,20589	
250 μ 15%-4 MI-20-0209	8,62	13,56		Rotura completa	0,2249	26,0943	1,92435	
250 μ 15%-5 MI-20-0210	8,58	13,62		Rotura completa	0,3124	36,4185	2,67390	
250 μ 15%-6 MI-20-0211	8,55	13,24		Rotura completa	0,2489	29,1155	2,19906	
Promedio						0,2744	31,6261	2,33736
Desviación estándar					S_{n-1}	0,0729	8,2654	0,61087
Coeficiente de variación					CV	26,5767	26,1347	26,13499

15%-600μm

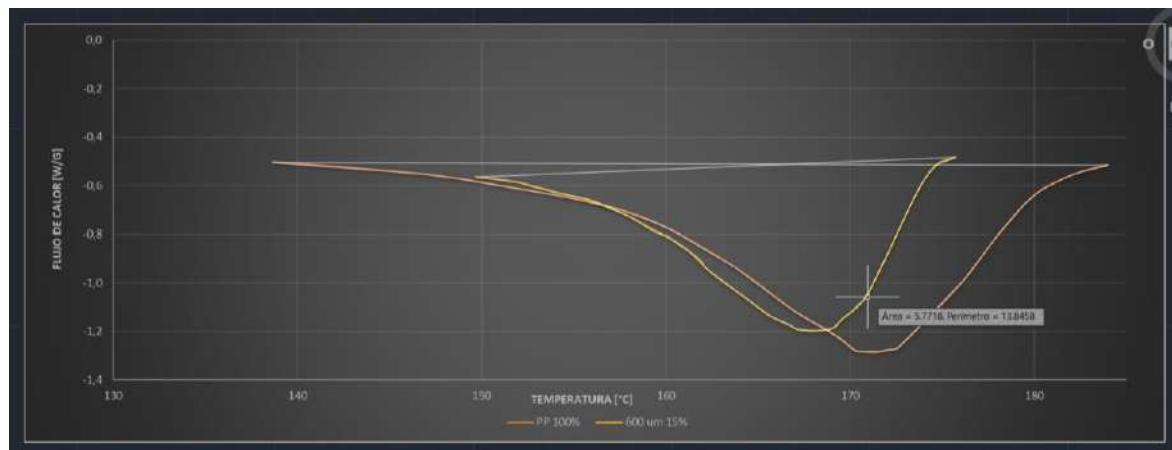
15%-600μm								
Muestra No.	Ancho (mm)	Profundidad (mm)	Probeta (ASTM D256-10)	Tipo de Falla	Energía de impacto (J)	Energía / longitud (J/m)	Energía / área (kJ/m ²)	
600μ 15%-1 MI-20-212	8,70	13,75	E (sin muesca)	Rotura completa	0,3244	37,2922	2,71216	
600μ 15%-2 MI-20-213	8,49	13,67		Rotura completa	0,4248	50,0365	3,66031	
600μ 15%-3 MI-20-214	8,63	13,64		Rotura completa	0,3462	40,1174	2,94115	
600μ 15%-4 MI-20-215	8,45	13,55		Rotura completa	0,2627	31,0907	2,29451	
600μ 15%-5 MI-20-216	8,70	13,61		Rotura completa	0,3053	35,0955	2,57865	
600μ 15%-6 MI-20-217	8,62	13,42		Rotura completa	1,1813	137,0430	10,2119	
Promedio						0,4741	55,1126	4,06645
Desviación estándar					S_{n-1}	0,3506	40,6412	3,04582
Coeficiente de variación					CV	73,9428	73,7421	74,90137

Anexo IX. Ejemplo de cálculo DSC

Área del 100%PP obtenido en AutoCad.



Área del material compuesto 15%-600µm obtenido en AutoCad.



Datos:

$$A_1 = 8.8687 \frac{[W^\circ C]}{[g]}$$

$$A_2 = 5.7718 \frac{[W^\circ C]}{[g]}$$

$$10^\circ C = 1 \text{ min}$$

Donde:

A_1 = Área del 100%PP obtenido en AutoCad

A_2 = Área del material compuesto 15%-600µm obtenido en AutoCad

Cálculo de la entalpia de fusión (h_m)

La entalpia de fusión es el área de la curva conformada con la temperatura inicial cuando el material empieza a fundirse hasta llegar a una temperatura final de fundición, donde h_m nos da con las siguientes unidades $\frac{J}{g}$.

$$h_{m1} = \frac{8.8687 \text{ W}^\circ\text{C}}{g} * \frac{1 \text{ min}}{10 \text{ }^\circ\text{C}} * \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} * \frac{J}{\text{Ws}} = 53.2122 \frac{J}{g}$$

$$h_{m2} = \frac{5.7718 \text{ W}^\circ\text{C}}{g} * \frac{1 \text{ min}}{10 \text{ }^\circ\text{C}} * \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} * \frac{J}{\text{Ws}} = 34.6308 \frac{J}{g}$$

Donde:

h_{m1} = Entalpia de fusión de 100%PP

h_{m2} = Entalpia de fusión del material compuesto 15%-600 μ m

Cálculo de X_c

$$X_c = \frac{\Delta h_{m,exp}}{\Delta h_{m,100\%}} * 100 \quad (2.4)$$

Donde:

$\Delta h_{m,100\%}$ = Entalpia de fusión del polímero 100% cristalino =170 J/g

$\Delta h_{m,exp}$ = Entalpia de fusión obtenida de la muestra del compuesto

100%PP:

$$X_c = \frac{53.2122}{170} * 100 = 31.3$$

15%-600 μ m:

$$X_c = \frac{34.6308}{170} * 100 = 20.37$$