



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

UNIDAD DE TITULACIÓN

CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO DE POLIPROPILENO REFORZADO CON CASCARILLA DE ARROZ OBTENIDO POR EXTRUSIÓN

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

PUCACHAQUI SIMBA RICHARD ANDRÉS

richard.pucachaqui@epn.edu.ec

TAIPE SÁNCHEZ ORLANDO XAVIER

orlando.taipe@epn.edu.ec

DIRECTOR:

Ing. DÍAZ CAMPOVERDE CARLOS WIME, M.Sc.

carlos.diaz@epn.edu.ec

CO-DIRECTOR:

Ing. SOTOMAYOR GRIJALVA MARÍA VERÓNICA

veronica.sotomayor@epn.edu.ec

Quito, diciembre de 2019

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por PUCACHAQUI SIMBA RICHARD ANDRÉS y TAIPE SÁNCHEZ ORLANDO XAVIER, bajo mi supervisión.

Ing. Carlos Díaz, M.Sc.
DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. Verónica Sotomayor
CO-DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotros, Richard Andrés Pucachaqui Simba y Orlando Xavier Taipe Sánchez, 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 hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

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

**Richard Andrés
Pucachaqui Simba**

**Orlando Xavier
Taipe Sánchez**

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi gratitud a Dios, quien con su bendición llena siempre mi vida y a mis padres y hermano por estar siempre presentes en mi vida.

Mi profundo agradecimiento a las autoridades y personal que hacen la Escuela Politécnica Nacional, por confiar en mí, abrirme las puertas para mi preparación durante el tiempo que duro mi vida estudiantil.

De la misma manera a la Facultad de Mecánica y sus laboratorios, a mis profesores, compañeros y amigos que conocí durante mi estadía en la institución.

A mi compañero de tesis Richard por compartir y confiar en mí para el desarrollo de este proyecto.

Al Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros (CIAP), sus autoridades y personal que labora en este centro, por permitirnos conocer y utilizar los equipos para realizar el estudio de nuestro tema de investigación.

Finalmente quiero expresar mis sinceros agradecimientos al Ing. Carlos Díaz y Ing. Verónica Sotomayor, principales colaboradores durante todo este proceso, quien, con su dirección, conocimiento y enseñanza permitió la culminación de este proyecto de tesis con éxito.

Orlando

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a mis padres por haberme dado la vida y haber forjado en mi valores y principios de bien, les debo todo lo que soy, su apoyo incondicional y su guía durante toda mi vida me ha permitido ser feliz. Son mi mayor orgullo y mi ejemplo de vida.

A mis hermanos Nataly y Jonathan, por su cariño, confianza, compañía y motivación durante cada momento de mi vida.

A Dayana, por su apoyo incondicional y desinteresado.

A mi amigo y compañero de tesis, Orlando por su esfuerzo, confianza y dedicación a lo largo del desarrollo de este proyecto.

A todos mis amigos, presentes durante esta etapa de mi vida, con ellos compartí momentos únicos e inolvidables.

A la Escuela Politécnica Nacional, en especial a la Facultad de Ingeniería Mecánica y sus docentes, por todos los conocimientos, valores e ideales transmitidos, ya que fueron, son y serán de suma importancia a lo largo de mi formación personal y profesional.

Al Ing. Carlos Díaz, e Ing. Verónica Sotomayor, por su guía durante el desarrollo de este trabajo, sus conocimientos transmitidos, consejos y recomendaciones, fueron de claves durante cada etapa de este proyecto.

A todas las personas que conforman el Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros (CIAP) y el laboratorio de nuevos materiales (LANUM) por todas las facilidades brindadas para el desarrollo de este proyecto.

Richard

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a mi familia especialmente a mis padres Luis T. y Elvia S. a mi hermano Darwin T. por haber sido mi apoyo a lo largo de toda mi carrera universitaria.

A todas las personas que me acompañaron en esta etapa y contribuyeron a mi formación profesional y como ser humano, permitiéndome así culminar mi carrera profesional con éxito.

Orlando

Dedico este trabajo a mis padres, Ramón Pucachaqui y Rosa Simba, por todo el esfuerzo empleado en dar la mejor educación a mí y mis hermanos

Richard

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN	i
DECLARACIÓN	ii
AGRADECIMIENTO	iii
DEDICATORIA	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABLAS	xiii
LISTA DE ANEXOS	xv
RESUMEN	xvi
ABSTRACT	xvii
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	2
Objetivo General	2
Objetivos Específicos	2
1. MATERIALES COMPUESTOS	3
1.1. Materiales compuestos	3
1.1.1. Historia de materiales compuestos	3
1.1.2. Definición de material compuesto	3
1.1.2.1. Matriz	4
1.1.2.2. Refuerzo	4
1.1.3. Tipos de materiales compuestos	5
1.1.3.1. Materiales compuestos con fibras	5
1.1.3.2. Materiales compuestos particulado	5
1.1.3.3. Materiales compuestos estructurales	6
1.1.4. Propiedades de los materiales compuestos	6
1.1.4.1. Principales ensayos para caracterizar un material compuesto	6
1.2. Materiales orgánicos	6
1.2.1. Materiales lignocelulósicos	7
1.2.2. Composición de los materiales lignocelulósicos	7
1.2.2.1. Celulosa	7

1.2.2.2.	Hemicelulosa	7
1.2.2.3.	Lignina	7
1.2.3.	Cascarilla de arroz	8
1.2.4.	Aplicaciones de la cascarilla de arroz.....	8
1.3.	Materiales compuestos con refuerzos orgánicos	9
1.3.1.	Disposición de refuerzos en materiales compuestos	9
1.3.1.1.	Fibras orgánicas	9
1.3.1.2.	Partículas orgánicas.....	10
1.4.	Materiales compuestos con matriz polimérica y refuerzos orgánicos.....	10
1.4.1.	Clasificación de matrices poliméricas	10
1.4.1.1.	Termoplásticos	11
1.4.1.2.	Termoestables	11
1.4.1.3.	Elastómeros.....	11
1.4.2.	Materiales compuestos con matriz polimérica	11
1.5.	Métodos de procesamiento de los compuestos de matriz polimérica con refuerzos orgánicos.	12
1.5.1.	Métodos de procesamiento.....	12
1.5.1.1.	Moldeo por estratificación manual	13
1.5.1.2.	Moldeo por aspersión.....	13
1.5.1.3.	Extrusión.....	14
1.5.1.4.	Compresión	14
1.5.1.5.	Inyección.....	15
1.5.1.6.	Pultrusión.....	16
1.5.1.6.	Transferencia de resina.....	16
2.	MATERIALES Y METODOS	18
2.1.	Materiales utilizados	18
2.1.1.	Matriz	18
2.1.2.	Refuerzo	19
2.1.3.	Compatibilizante	20

2.2.	Procedimiento experimental	20
2.2.1.	Planteamiento experimental para obtener el biocompuesto	22
2.2.1.1.	Tamaño de grano del refuerzo.....	22
2.2.1.2.	Presencia de compatibilizante	22
2.2.1.3.	Nomenclatura del biocompuesto	23
2.2.1.4.	Composiciones en peso	23
2.2.2.	Procesamiento del biocompuesto	24
2.2.2.1.	Selección del refuerzo.....	24
2.2.2.2.	Molturación	24
2.2.2.3.	Tamizado	25
2.2.2.4.	Secado previo a la extrusión	26
2.2.2.5.	Extrusión.....	27
2.2.2.6.	Secado previo a la inyección	31
2.2.2.7.	Inyección.....	31
2.2.3.	Caracterización del biocompuesto	33
2.2.3.1.	Parámetros de extrusión	33
2.2.3.2.	Parámetros de inyección.....	34
2.2.3.3.	Ensayo de tracción	35
2.2.3.4.	Ensayo de flexión	37
2.2.3.5.	Ensayo de impacto	39
2.2.3.6.	Ensayo de dureza.....	40
2.2.3.7.	Determinación de la densidad.....	41
2.2.3.8.	Análisis termogravimétrico (TGA)	41
2.2.3.9.	Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR)	43
3.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	44
3.1.	Resultados obtenidos	44
3.1.1.	Refuerzo	44
3.1.1.1.	Caracterización térmica.....	44
3.1.2.	Matriz	45

3.1.2.1.	Caracterización mecánica	45
3.1.2.2.	Caracterización térmica.....	49
3.1.2.3.	Determinación de la densidad.....	51
3.1.3.	Biocompuestos con MAPP.....	51
3.1.3.1.	Caracterización mecánica	51
3.1.3.2.	Caracterización térmica.....	56
3.1.3.3.	Determinación de la densidad.....	58
3.1.4.	Biocompuestos sin MAPP	58
3.1.4.1.	Caracterización mecánica	58
3.1.4.2.	Caracterización térmica.....	63
3.1.4.3.	Determinación de la densidad.....	64
3.1.5.	Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR)	65
3.2.	Análisis de resultados obtenidos	66
3.2.1.	Ensayo de tracción	66
3.2.2.	Ensayo de flexión	75
3.2.3.	Ensayo de impacto IZOD	77
3.2.4.	Ensayo de dureza.....	80
3.2.5.	Análisis Termogravimétrico (TGA).....	81
3.2.6.	Determinación de la densidad.....	84
3.2.7.	Espectroscopia infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR)	85
3.3.	Comparación de los resultados obtenidos.....	87
3.3.1.	Biocompuestos con cascarilla de arroz como refuerzo	87
3.3.2.	Biocompuestos con polipropileno como matriz	90
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	94
4.1.	Conclusiones	94
4.2.	Recomendaciones.....	95
BIBLIOGRAFÍA	96	
ANEXOS	101	

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Clasificación de las matrices en los materiales compuestos. (Fuente: Propia)...	4
Figura 1.2. Clasificación de los materiales compuestos. (Fuente: Propia).....	5
Figura 1.3. Clasificación de las matrices poliméricas. (Fuente: Propia).....	11
Figura 2.1. Polipropileno homopolímero PETROQUIM PH1310. (Fuente: Propia).....	18
Figura 2.2. Cascarilla de arroz. (Fuente: Propia)	19
Figura 2.3. Procedimiento para obtener el biocompuesto. (Fuente: Propia).....	21
Figura 2.4. Molino de cuchillas rotatorias. (Fuente: Propia)	24
Figura 2.5. Tamiz N° 35, según ASTM E11. (Fuente: Propia).....	25
Figura 2.6. Tamizadora. (Fuente: Propia)	25
Figura 2.7. Estufa Venticell del CIAP. (Fuente: Propia).....	26
Figura 2.8. Cascarilla de arroz (RH), lista para el secado. (Fuente: Propia).....	26
Figura 2.9. Extrusora XINDA PSHJ - 35. (Fuente: Propia)	27
Figura 2.10. Pellets de biocompuesto. (Fuente: Propia).....	30
Figura 2.11. Pellets de biocompuesto, listo para el secado. (Fuente: Propia)	31
Figura 2.12. Inyectora Milacron MT 55. (Fuente: Fabricante).....	32
Figura 2.13. Dimensiones de la probeta de tracción tipo I, establecidas según norma ASTM D638-14. (Fuente: ASTM D638-14).....	35
Figura 2.14. Probeta de tracción del tipo I. (Fuente: Propia)	35
Figura 2.15. Ensayo de tracción a probeta del tipo I, a) Ensayo de tracción espécimen PP100, b) Ensayo de tracción espécimen PP92-RH5-MAPP. (Fuente: Propia)	36
Figura 2.16. Probeta de tracción, a) ensayada, b) sin ensayar. (Fuente: Propia).....	36
Figura 2.17. Probeta de flexión. (Fuente: Propia)	37
Figura 2.18. Encerado previo al ensayo de flexión. (Fuente: Propia).....	38
Figura 2.19. Ensayo de flexión a probeta del tipo I, a) Ensayo de flexión espécimen PP100, b) Ensayo de flexión espécimen PP82-RH15-MAPP. (Fuente: Propia)	38
Figura 2.20. Probeta de flexión, a) ensayada, b) sin ensayar. (Fuente: Propia).....	39
Figura 2.21. Probeta de impacto. (Fuente: Propia).....	39
Figura 2.22. Ensayo de impacto espécimen PP85-RH15. (Fuente: Propia)	40
Figura 2.23. Probeta de impacto, a) ensayada, b) sin ensayar. (Fuente: Propia).....	40
Figura 2.24. Durómetro Bareiss escala Shore D. (Fuente: Propia)	40
Figura 2.25. Determinación de dureza sobre espécimen PP100. (Fuente: Propia).....	41
Figura 2.26. Analizador termogravimétrico PYRIS 1 TGA. (Fuente: Propia).....	42
Figura 2.27. Espectrómetro JASCO FT/IR-6800. (Fuente: Propia).....	43
Figura 3.1. Termograma de TGA, correspondiente a la muestra de material de refuerzo RH. (Fuente: Propia)	45

Figura 3.2. Curva Esfuerzo (MPa) vs Deformación (%), correspondiente al ensayo de tracción sobre el polipropileno (PP). (Fuente: Propia)	46
Figura 3.3. Probeta de polipropileno puro sometida a tracción. (Fuente: Propia)	47
Figura 3.4. Curva Esfuerzo (MPa) vs Deformación (%), correspondiente al ensayo de flexión sobre el polipropileno (PP). (Fuente: Propia)	48
Figura 3.5. Probetas de PP100 sometidas a ensayo de impacto IZOD. (Fuente: Propia)....	49
Figura 3.6. Termograma de TGA, correspondiente a la muestra de Polipropileno PP100. (Fuente: Propia)	50
Figura 3.7. Curva Esfuerzo (MPa) vs Deformación (%), correspondiente al ensayo de tracción sobre biocompuestos con MAPP. (Fuente: Propia)	52
Figura 3.8. Probetas de biocompuesto con MAPP sometida a tracción a) probeta ensayada, b) probeta sin ensayar. (Fuente: Propia)	53
Figura 3.9. Curva Esfuerzo (MPa) vs Deformación (%), correspondiente al ensayo de flexión sobre biocompuestos con MAPP. (Fuente: Propia)	54
Figura 3.10. Probetas de biocompuesto de distintas composiciones después de ser sometidas a ensayo de flexión. De arriba hacia abajo respectivamente las muestras PP100, PP92-RH5-MAPP, PP82-RH15-MAPP, PP72-RH25-MAPP. (Fuente: Propia).....	54
Figura 3.11. Probetas de biocompuesto con MAPP, sometidas a ensayo de impacto IZOD. (Fuente: Propia)	55
Figura 3.12. Termograma de TGA, correspondiente a la muestra de polipropileno PP100. (Fuente: Propia)	57
Figura 3.13. Curva Esfuerzo (MPa) vs Deformación (%), correspondiente al ensayo de tracción sobre biocompuestos sin MAPP. (Fuente: Propia)	59
Figura 3.14. Probetas de biocompuesto sin MAPP sometida a tracción a) probeta ensayada, b) probeta sin ensayar. (Fuente: Propia)	60
Figura 3.15. Curva Esfuerzo (MPa) vs Deformación (%), correspondiente al ensayo de flexión sobre biocompuestos sin MAPP. (Fuente: Propia)	61
Figura 3.16. Probetas de biocompuesto de distintas composiciones después de ser sometidas a ensayo de flexión. De arriba hacia abajo respectivamente las muestras PP100, PP95-RH5, PP85-RH15, PP75-RH25. (Fuente: Propia)	61
Figura 3.17. Probetas de biocompuesto sin MAPP sometidas a ensayo de impacto IZOD. (Fuente: Propia)	62
Figura 3.18. Termograma de TGA, correspondiente a la muestra de polipropileno PP100. (Fuente: Propia)	64
Figura 3.19. Espectrograma, correspondiente al polipropileno. (Fuente: Propia).....	65
Figura 3.20. Espectrograma, correspondiente a la cascarilla de arroz. (Fuente: Propia).....	66
Figura 3.21. Espectrograma, correspondiente al biocompuesto. (Fuente: Propia).....	66

Figura 3.22. Resistencia a la tracción obtenida en el biocompuesto. (Fuente: Propia)	67
Figura 3.23. Elongación máxima luego de realizar el ensayo de tracción en todas las composiciones. (Fuente: Propia)	68
Figura 3.24. Fractura en probeta de polipropileno. (Fuente: Propia).....	69
Figura 3.25. Fractura en probetas de biocompuesto con MAPP, de izquierda a derecha PP92-RH5-MAPP, PP82-RH15-MAPP y PP72-RH25-MAPP. (Fuente: Propia)	70
Figura 3.26. Fractura en probetas de biocompuesto sin MAPP, de izquierda a derecha PP95-RH5, PP85-RH15 y PP75-RH25. (Fuente: Propia)	70
Figura 3.27. Microscopía óptica, sobre composiciones de biocompuesto sin MAPP. (Fuente: Propia)	71
Figura 3.28. Microscopía óptica, sobre composiciones de biocompuesto con MAPP. (Fuente: Propia)	72
Figura 3.29. Resistencia a la tracción en rotura obtenida en el biocompuesto. (Fuente: Propia)	73
Figura 3.30. Módulo de elasticidad en el biocompuesto. (Fuente: Propia).....	74
Figura 3.31. Resistencia a la flexión obtenida en el biocompuesto. (Fuente: Propia)	76
Figura 3.32. Deformación por flexión en el esfuerzo máximo. (Fuente: Propia)	77
Figura 3.33. Energía de impacto absorbida por las composiciones al ser sometidas a impacto IZOD. (Fuente: Propia).....	78
Figura 3.34. Resistencia al impacto por unidad de área, obtenida al realizar el ensayo de impacto IZOD. (Fuente: Propia).....	79
Figura 3.35. Dureza obtenida en las composiciones de biocompuesto. (Fuente: Propia)	81
Figura 3.36. Porcentaje en peso de material degradado al realizar el análisis TGA. (Fuente: Propia).....	82
Figura 3.37. Comportamiento del biocompuesto, su matriz y refuerzo, al someterlos a análisis TGA. (Fuente: Propia).....	82
Figura 3.38. Variación de la densidad del biocompuesto en función del refuerzo y MAPP. (Fuente: Propia)	84
Figura 3.39. Espectrografía FTIR, Polipropileno vs Cascarilla de arroz. (Fuente: Propia)	85
Figura 3.40. Espectrografía FTIR, Polipropileno vs Biocompuesto. (Fuente: Propia).....	86
Figura 3.41. Biocompuestos con cascarilla de arroz como refuerzo. (Fuente: Propia).....	89
Figura 3.42. Biocompuestos con polipropileno como matriz. (Fuente: Propia).....	92

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Propiedades de la cascarilla y ceniza de la cascarilla arroz.....	8
Tabla 1.2. Aplicaciones y usos de la cascarilla de arroz.....	9
Tabla 2.1. Propiedades Polipropileno (PH1310).....	19
Tabla 2.2. Principales propiedades de la cascarilla de arroz.....	20
Tabla 2.3. Nomenclatura utilizada en el biocompuesto.	23
Tabla 2.4. Composiciones previstas del biocompuesto.	23
Tabla 2.5. Características técnicas de extrusora XINDA PSHJ-35.	29
Tabla 2.6. Etapas de inyectora MILACRON MT 55.	33
Tabla 2.7. Parámetros de extrusión.....	34
Tabla 2.8. Perfil de temperaturas en la inyectora.....	34
Tabla 2.9. Parámetros de inyección.	34
Tabla 2.10. Parámetros establecidos para análisis termogravimétrico (TGA).	42
Tabla 3.1. Características del material de refuerzo, sometido a TGA.	44
Tabla 3.2. Características del polipropileno PP, obtenidas después de someter las probetas respectivas al ensayo de tracción y de acuerdo a la ficha técnica.	46
Tabla 3.3. Características de las composiciones del polipropileno PP, obtenidas después de someter las probetas respectivas al ensayo de flexión.....	47
Tabla 3.4. Características del polipropileno PP, obtenidas después de someter las probetas respectivas al ensayo de impacto IZOD.....	48
Tabla 3.5. Características del polipropileno PP, obtenidas después de someter las probetas correspondientes a ensayo de dureza.....	49
Tabla 3.6. Características de la muestra de polipropileno, PP100, sometida a TGA.	50
Tabla 3.7. Densidad de la muestra de polipropileno, PP100.....	51
Tabla 3.8. Características del biocompuesto con MAPP, obtenidas después de someter las probetas respectivas al ensayo de tracción.	52
Tabla 3.9. Características de las composiciones de biocompuesto con MAPP, obtenidas después de someter las probetas respectivas al ensayo de flexión.....	53
Tabla 3.10. Características del biocompuesto con MAPP, obtenidas después de someter las respectivas probetas al ensayo de impacto IZOD.....	55
Tabla 3.11. Características del biocompuesto con MAPP, obtenidas después de someter las probetas correspondientes a ensayo de dureza.	56
Tabla 3.12. Características de las muestras de biocompuesto con MAPP, sometidas a TGA.	57
Tabla 3.13. Densidad de las muestras de biocompuesto con MAPP.....	58

Tabla 3.14. Características del biocompuesto sin MAPP, obtenidas después de someter las probetas respectivas al ensayo de tracción.	59
Tabla 3.15. Características de las composiciones de biocompuesto sin MAPP, obtenidas después de someter las probetas respectivas al ensayo de flexión.	60
Tabla 3.16. Características del biocompuesto sin MAPP, obtenidas después de someter las respectivas probetas al ensayo de impacto IZOD.	62
Tabla 3.17. Características del biocompuesto sin MAPP, obtenidas después de someter las probetas correspondientes a ensayo de dureza.	63
Tabla 3.18. Características de las muestras de biocompuesto sin MAPP, sometidas a TGA.	64
Tabla 3.19. Densidad de las muestras de biocompuesto con MAPP.	65
Tabla 3.20. Características del polipropileno y el biocompuesto, obtenidos después de ser sometidos a tracción.	67
Tabla 3.21. Características del polipropileno y el biocompuesto, obtenidos después de ser sometidos a flexión.	75
Tabla 3.22. Características del polipropileno y el biocompuesto, obtenidos después de ser sometidas a impacto IZOD.	78
Tabla 3.23. Características del polipropileno y el biocompuesto, obtenidos después de ser sometidas al ensayo de dureza.	80
Tabla 3.24. Propiedades mecánicas de materiales compuestos con cascarilla de arroz como refuerzo y matrices poliméricas.	88
Tabla 3.25. Propiedades mecánicas de materiales compuestos, con refuerzos orgánicos y polipropileno como matriz.	91

LISTA DE ANEXOS

Anexo I. Características polipropileno PH 1013 PETROQUIM.....	101
Anexo II. Características Polipropileno maleizado (MAPP)	102
Anexo III. Características técnicas Inyectora MILACRON MT55.....	103
Anexo IV. Características técnicas Extrusora XINDA PSHJ 35.....	104
Anexo V. Tamices, según norma ASTM E11.	105
Anexo VI. Ensayo de tracción (Resultados)	106
Anexo VII. Ensayo de flexión (Resultados)	111
Anexo VIII. Ensayo de impacto (Resultados).....	118
Anexo IX. Ensayo de dureza (Resultados).....	122
Anexo X. Densidad (Resultados).....	123

RESUMEN

En esta investigación se caracterizó un material biocompuesto debido a la naturaleza orgánica del refuerzo, con porcentaje en peso de 5,15 y 25 % de partículas de cascarilla de arroz en una matriz de polipropileno homopolímero

El desarrollo del biocompuesto inicia con la adquisición de la materia prima para posteriormente obtener el material de refuerzo al moler y tamizar la cascarilla de arroz consiguiendo así partículas de tamaño uniforme. El proceso usado en el procesamiento del biocompuesto es la extrusión; en esta etapa se fabrica pellets de biocompuesto con diferentes composiciones que pueden o no incluir un agente compatibilizante. Se empleó moldeo por inyección para fabricar las probetas que fueron utilizadas para realizar los ensayos de caracterización del material: mecánicos (tracción, flexión, impacto IZOD y dureza), de caracterización térmica (TGA), espectroscopia infrarroja (FTIR) y determinación de la densidad.

Finamente se realiza un análisis comparativo entre las composiciones de biocompuesto obtenidas con respecto a la matriz y el refuerzo. Se analiza la influencia del refuerzo y el compatibilizante sobre la matriz, por medio de valores, gráficas y espectroscopias FTIR. También se muestra una comparación entre la composición de biocompuesto más representativa frente a otros materiales compuestos existentes en la actualidad.

Se concluye que la adición de compatibilizante en el biocompuesto, permite mejorar los valores de resistencia a la tracción, flexión e impacto en probetas cuya composición incluye 25% de refuerzo y 3% de compatibilizante (MAPP).

La totalidad de esta investigación fue desarrollada en los laboratorios pertenecientes a la Escuela Politécnica Nacional.

Palabras clave: Biocompuesto, cascarilla de arroz, Polipropileno, Compatibilizante.

ABSTRACT

In this research a biocomposite material was characterised due to the organic nature of the reinforcement, with a percentage by weight of 5,15 and 25 % of rice husk particles in a homopolymer polypropylene matrix.

The development of the biocomposite begins with the acquisition of the raw material and then the obtaining of the reinforcement material by grinding and sifting the rice husk, in order to get particles of uniform size. The process used in the processing of the biocomposite is extrusion; in this stage, biocomposite pellets are manufactured with different compositions that may or may not include a compatibility agent. Injection moulding was used to manufacture the specimens used to carry out the material characterisation tests: mechanical (tensile, bending, IZOD impact and hardness), thermal characterisation (TGA), infrared spectroscopy (FTIR) and density determination.

Finally, a comparative analysis is carried out between the biocomposite compositions obtained with respect to the matrix and the reinforcement. The influence of the reinforcement and the compatibility agent on the matrix is analyzed by means of FTIR values, graphs and spectroscopies. A comparison is also shown between the most representative biocomposite composition compared to other currently existing composite materials.

It is concluded that the addition of compatibilizer in the biocomposite allows improving the values of tensile, flexural and impact resistance in specimens whose composition includes 25% reinforcement and 3% compatibilizer (MAPP).

All of this research was carried out in laboratories belonging to the National Polytechnic School.

Keywords: Biocomposite, rice husk, Polypropylene, Compatibilizer.

CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO DE POLIPROPILENO REFORZADO CON CASCARILLA DE ARROZ OBTENIDO POR EXTRUSIÓN

INTRODUCCIÓN

Desde el siglo pasado los materiales poliméricos han adquirido importancia y protagonismo dentro de gran cantidad de industrias por sus atractivas propiedades físicas, químicas y mecánicas, así como por su fácil manejo y bajos costos en relación a otros materiales. Sin embargo, aún existen ciertas limitaciones en lo que respecta a reciclaje por lo que surge la necesidad de realizar combinaciones con materiales orgánicos abriendo así una nueva gama de materiales.

Actualmente la industria de los materiales compuestos con refuerzo orgánico es un área con un creciente interés por su biodegradabilidad, renovabilidad, bajos costos de producción, ligereza, reciclabilidad, entre otros. El uso de este tipo de materiales va en aumento cada año y actualmente poseen una demanda anual de hasta el 15% en aplicaciones automotrices y de hasta un 50% en aplicaciones de construcción [1].

Los materiales compuestos con fibras y/o partículas orgánicas como refuerzos pasan a llamarse biocompuestos. Los refuerzos en su mayoría provienen de la madera y su utilización en el desarrollo de biocompuestos es bastante amplia y suficiente, es por ello que actualmente el enfoque en la selección de refuerzos en los biocompuestos ha cambiado, debido al paulatino agotamiento de recursos madereros, así como la mayor demanda en materiales livianos, de altas prestaciones y baratos, lo que actualmente ha llevado a buscar nuevos refuerzos con propiedades similares o mejores que los refuerzos madereros; es así que se busca en las fibras lignocelulósicas no maderosas alternativas mucho más versátiles. Entre las principales fibras lignocelulósicas a lo largo del mundo se puede encontrar al trigo, bambú, arroz, maíz, etc.

En el 2018, la producción de arroz fue de 769,9 millones de toneladas, de donde se obtiene la cascarilla de arroz como residuo; el cual se utiliza principalmente como combustible, fertilizante y otras aplicaciones orgánicas [2]. Pero su uso en la actualidad no es muy significativo por la baja cantidad de nutrientes que contiene y la existencia de fertilizantes mucho más efectivos; por lo que en muchos casos este material es quemado y eliminado. Sin embargo, su destrucción por quema aumenta las emisiones de CO₂ hacia la atmosfera.

La cascarilla de arroz es ideal como refuerzo de un biocompuesto debido a su abundancia y bajo costo, siendo esta una potencial alternativa a la actual disposición final de este residuo.

La cascarilla de arroz se caracteriza por tener en su estructura celulosa, hemicelulosa y lignina, presentando porcentajes de celulosa similares a los de la madera. La cascarilla de arroz tiene mayor resistencia microbiana que la madera, así como una mayor resistencia frente a temperaturas elevadas, derivando en procesos de producción y procesamiento más variados y complejos. Por lo tanto, es una gran alternativa a usarse como refuerzo en lugar de la madera, ayudando directamente a la conservación de las reservas de madera y reduciendo las emisiones que se producen durante su quemado.

OBJETIVOS

Objetivo General

Caracterizar un material compuesto de polipropileno reforzado con cascarilla de arroz, obtenidos por medio de extrusión e inyección.

Objetivos Específicos

- Obtener un material compuesto con matriz de polipropileno y refuerzo de cascarilla de arroz, utilizando un proceso de extrusión.
- Caracterizar las probetas obtenidas, aplicando ensayos de flexión, tracción e impacto, caracterización térmica y determinación de la densidad
- Analizar y evaluar las propiedades del material compuesto obtenido.
- Comparar las propiedades del material compuesto obtenido en relación a otros materiales compuestos.

1. MATERIALES COMPUESTOS

En este capítulo se describirán conceptos de importancia respecto a materiales compuestos, destacando las características de sus interfases (matriz y refuerzo), así como sus principales métodos de procesamiento.

1.1. Materiales compuestos

1.1.1. Historia de materiales compuestos

La humanidad está en constante evolución en diferentes aspectos tanto sociales como culturales y técnicos. Dentro de los aspectos técnicos se han descubierto nuevos materiales o una combinación de los mismos.

En la edad de piedra el hombre dependía principalmente de materiales como la piedra, los polímeros naturales y compuestos de celulosa (madera), los que utilizaba para la construcción, herramientas, vivienda y armas [3] [4].

Desde el principio de la humanidad se han utilizado los materiales compuestos que se encontraron en la naturaleza, por ejemplo, la madera que contiene fibra de celulosa unido con una matriz de lignina. Otro caso es las viviendas que se construían con adobe y paja; también se puede mencionar entre ellos al bareque que es un sistema de construcción donde se utiliza palos de caña entretreídos y recubiertos de barro [3] [4].

En la actualidad las grandes compañías generan nuevas tendencias en materiales poliméricos, cerámicos y compuestos, desarrollando aplicaciones avanzadas en donde se destaca la producción de materiales artificiales o de ingeniería; abriendo nuevas fronteras hacia los nanocompuestos, con mejores propiedades y de fácil aplicación para la humanidad [3] [4].

1.1.2. Definición de material compuesto

El material compuesto es la unión de dos o más componentes para obtener un nuevo material que contiene propiedades específicas diferentes a sus elementos originales, sin la utilización de reacciones químicas. Se pueden identificar dos fases una continua que está constituida por la matriz y la segunda fase discontinua denominada refuerzo. Al material compuesto se lo considera un material multifásico porque adopta las propiedades de las fases que lo constituyen [4] [5].

Para que un material compuesto tenga las propiedades requeridas se debe seleccionar los componentes y sus proporciones adecuadas, así como la configuración de cada elemento para obtener una buena interfaz. Los materiales compuestos pueden desempeñar y satisfacer las necesidades tecnológicas e industriales actuales.

Al material compuesto se le pueden añadir agentes de acoplamiento y revestimiento para mejorar la unión entre la matriz y el refuerzo y tener una interfase (unión) lo más compacta posible, acabado superficial moderado y obteniendo mejoras en el material final [4] [5] [6].

1.1.2.1. Matriz

La matriz es la parte fundamental de un material compuesto, pues es donde se aloja el refuerzo ya sea en forma de fibras o de partículas; también soporta las cargas máximas y lo transmite a los refuerzos por medio de interfases. Las propiedades de un material compuesto dependen del tipo de interfase y de las características de los elementos que lo constituyen [3] [4].

Las matrices orgánicas son las más utilizadas para procesar materiales compuestos y se utilizan con refuerzo de fibras o partículas; las principales funciones de la matriz son las siguientes:

- Tener buena estabilidad, transfiriendo las cargas al refuerzo.
- Actuar como sujetador, para mantener fijas y en posición a las fibras de refuerzo.
- Ayudar al refuerzo en contra del deterioro mecánico y químico del ambiente exterior.
- Evitar la propagación de grietas dentro del material compuesto.

Entre la gran cantidad de matrices disponibles actualmente se identifican 3 grandes grupos; en la Figura 1.1 se muestra una clasificación rápida de las mismas.

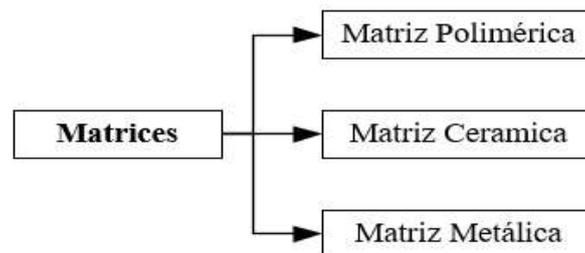


Figura 1.1. Clasificación de las matrices en los materiales compuestos.
(Fuente: Propia).

1.1.2.2. Refuerzo

Es la segunda fase discontinua o dispersa, esta se añade a la matriz para otorgar nuevas propiedades al material compuesto. En general el refuerzo se utiliza para aumentar la resistencia y rigidez mecánica; también ayuda a mejorar el comportamiento a altas temperaturas y mejorar la resistencia a la abrasión [4] [7]. Los refuerzos más comunes son los siguientes:

- Refuerzo particulado.
- Refuerzo en fibras.
- Elementos estructurales.

1.1.3. Tipos de materiales compuestos

Se tienen tres tipos de materiales compuestos dependiendo de la forma en la que se encuentra el refuerzo que pueden ser fibras, partículas o estructuras dentro de la matriz (Figura 1.2).

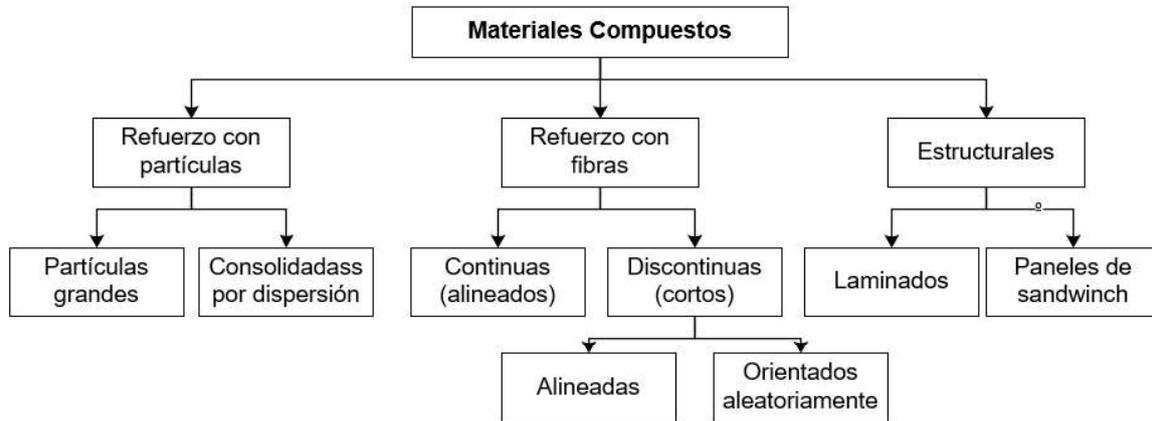


Figura 1.2. Clasificación de los materiales compuestos.
(Fuente: Propia)

1.1.3.1. Materiales compuestos con fibras

Son los más usados por su fácil manejo y elaboración y tienen excelentes propiedades mecánicas. La matriz transmite la fuerza a las fibras y proporciona ductilidad y tenacidad. Las fibras soportan la mayor parte del esfuerzo o tensión aplicada [4] [8].

1.1.3.2. Materiales compuestos particulado

En este tipo de materiales el refuerzo está en forma de partículas dentro de la matriz y se encuentra en tamaños grandes consolidados por dispersión; tiene una dureza elevada y son muy frágiles.

- **Partículas consolidadas o dispersión**

Este tipo de refuerzo considera tamaños de partículas entre 10 – 100 nm de diámetro. Estos refuerzos al aumentar la temperatura disminuyen la resistencia y el endurecimiento incrementa.

- **Partículas grandes**

Contienen grandes cantidades de partículas gruesas que no bloquean el desplazamiento de las dislocaciones con eficacia disminuyendo la resistencia mecánica [3].

1.1.3.3. Materiales compuestos estructurales

Un material estructural está constituido por materiales compuestos y homogéneos y sus propiedades no sólo dependen de los materiales constituyentes sino de la geometría de los elementos estructurales. Se clasifican en laminares y paneles sándwich [3] [5].

1.1.4. Propiedades de los materiales compuestos

Los materiales compuestos están sometidos a cargas mecánicas y térmicas, exponiéndose a esfuerzos y deformaciones, por lo que es importante estudiar su comportamiento para determinar el funcionamiento adecuado.

Las propiedades de los materiales homogéneos o isotrópicos no varían con la aplicación de esfuerzos; sin embargo, los materiales que contienen algún tipo de refuerzo varían su comportamiento en función de la naturaleza y distribución del refuerzo [3].

1.1.4.1. Principales ensayos para caracterizar un material compuesto

Para evaluar las propiedades mecánicas y caracterización de un material compuesto se debe realizar ensayos destructivos.

Para el experimento se usa una probeta de material que es sometida a ensayos de tracción, flexión, impacto y pruebas térmicas, con equipos que determinan las propiedades que presenta el material. Para este proceso se emplean normas técnicas tales como ASTM, ISO, INEN, ASME, UNE, entre otras, que aseguran la aplicación de procedimientos adecuados y determinan la forma y medidas exactas para el diseño de probetas así como también el número de ensayos necesarios que se aplica al nuevo material para que los resultados tengan validez [3].

1.2. Materiales orgánicos

La materia orgánica está compuesta por moléculas complejas formadas por carbono, hidrógeno, oxígeno que contienen células vegetales o animales. Estos materiales pueden disolverse en líquidos orgánicos tales como el alcohol o los tetracloruros; además no soportan altas temperaturas. A continuación, se enlistan los más importantes:

- Plásticos.
- Compuestos de petróleo.
- Madera.
- Papel.
- Hule.

Estos materiales orgánicos están formados por moléculas y son generalmente más blandos e inestables que los materiales inorgánicos.

1.2.1. Materiales lignocelulósicos

Es la principal pared celular de plantas contiene polisacáridos, compuestos fenólicos y compuestos minoritarios (minerales, lípidos, proteínas, etc.). Gran parte de los compuestos fenólicos están presentes en la estructura de la lignina; teniendo grandes cantidades de ceras, grasas y materia mineral [9].

Las fibras de las plantas tienen multitud de aplicaciones industriales principalmente en el sector papeler y textil. Los materiales lignocelulósicos como la madera, paja de cereal, entre otros se pueden mezclar para obtener otro tipo de materiales; además sirven como fuente de energía mediante la combustión y/o transformación en bioetanol u otros productos químicos. Los materiales lignocelulósicos provienen de residuos agrícolas, residuos forestales, residuos industriales y residuos urbanos [9].

1.2.2. Composición de los materiales lignocelulósicos

Los materiales lignocelulósicos están constituidos principalmente por: celulosa, hemicelulosa y lignina, constituyentes de la pared celular de las plantas. La cantidad y el tipo de estos compuestos pueden influir en los procesos industriales.

1.2.2.1. Celulosa

La celulosa son polisacáridos (carbohidratos) que por hidrolisis pueden ser convertidos en monosacáridos (azúcares simples) y es el componente mayoritario que se encuentra en los materiales lignocelulósicos también conocido como biomasa vegetal; la celulosa está conformada por grandes cadenas lineales de celobiosa [9].

1.2.2.2. Hemicelulosa

La hemicelulosa es un componente que tiene una estructura muy compleja y es menos resistente térmicamente, como resultado de la gran cantidad de azúcares que posee son polisacáridos con grupos heterogéneos, por lo que no es soluble en agua, pero sí en medios alcalinos. Las pajas de cereales como el trigo, arroz, centeno, cebada, etc. suelen contener entre 30 y 40% de hemicelulosa con algunas excepciones [9].

1.2.2.3. Lignina

La lignina se puede considerar como una red polimérica tridimensional al azar formada por unidades de fenilpropano unidas entre sí en diferentes posiciones. No se ha definido cuál es la estructura exacta de la lignina, pero lo que sí parece evidente de todas las estructuras propuestas para este material, es el gran contenido de núcleos aromáticos. Su función principal es la de transportar agua, nutrientes y metabolitos en el sistema vascular [9].

1.2.3. Cascarilla de arroz

La planta de arroz (*Oryza Sativa*) pertenece a la familia de las gramíneas. La cascarilla de arroz es un subproducto que se obtiene del proceso de molienda del grano de arroz. Esta se localiza en la parte exterior del grano de arroz maduro compuesta por vainas denominadas palea y lemma [10].

La cascarilla de arroz es de consistencia quebradiza, abrasiva y su color varía del pardo rojizo al púrpura oscuro. Su densidad es baja por lo que ocupa grandes espacios, su peso específico es de 125 kg/ m³ [10]. Las propiedades de la cascarilla y ceniza de la cascarilla arroz se muestran en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Propiedades de la cascarilla y ceniza de la cascarilla arroz.

Cascarilla de arroz		Ceniza de cascarilla de arroz	
Componente	%	Componentes	%
Carbono	39,12	Ceniza De Sílice (SiO ₂)	94,10
Hidrógeno	5,21	Óxido De Calcio (CaO)	0,55
Oxígeno	0,60	Óxido De Magnesio (MgO)	0,95
Azufre	37,21	Óxido De Potasio (K ₂ O)	2,19
Cenizas	0,10	Óxido De Sodio (Na ₂ O)	0,11
Otros	17,82	Sulfato	0,06
		Cloro	0,05
		Óxido De Titanio (TiO ₂)	0,05
		Óxido De Aluminio (Al ₂ O ₃)	0,12
		Otros (P ₂ O ₅) (F ₂ O ₃)	1,82
Total	100,00	Total	100,00

(Fuente: Prada & Cortés. (2010) [10])

1.2.4. Aplicaciones de la cascarilla de arroz

Debido a la gran cantidad de cascarilla de arroz que se produce y su posterior acumulación en los patios de pilado, es posible aprovechar este residuo en múltiples aplicaciones dentro de diferentes campos y por medio de diferentes métodos [10]. Las principales aplicaciones de la cascarilla de arroz se muestran en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Aplicaciones y usos de la cascarilla de arroz

1	Obtención de etanol por vía fermentativa
2	Tostado para su uso como sustrato en cultivo de flores
3	Generación de energía
4	Combustión controlada para el uso como sustrato en cultivos hidropónicos
5	Aprovechamiento de la cascarilla de arroz en compostaje y como lecho filtrante para aguas residuales
6	Obtención de materiales adsorbentes
7	Fuentes de sustancias químicas
8	Producción de aglomerados
9	Material Aislante
10	Cama en avicultura porcicultura y en transporte de ganado
11	Cenizas en cultivos

(Fuente: Prada & Cortés. (2010) [10])

1.3. Materiales compuestos con refuerzos orgánicos

Las agroindustrias generan como subproductos materiales en base a celulosa altamente fibrosos, por ejemplo: bagazo de caña, cascarilla de arroz, zacate, entre otros, que no son explotados completamente para una utilización adecuada. Una de las vertientes actuales para utilizar estos subproductos está en los biomateriales [11].

En las últimas décadas los materiales compuestos reforzados con material orgánico han tomado una mayor importancia por el tema de la contaminación medioambiental y la contaminación producida por el uso generalizado de materiales tóxicos en diferentes artículos. En la actualidad se busca utilizar materiales orgánicos como refuerzo debido a la elevada presencia de este tipo de materiales en el medio. Existen materiales orgánicos con propiedades muy adecuadas para la utilización como refuerzos dentro de una matriz; entre los más comunes se tiene plátano, henequén, sisal, madera, algodón, bambú, bagazo de caña, cascarilla de arroz, entre otros [3] [11].

1.3.1. Disposición de refuerzos en materiales compuestos

Los materiales compuestos que conllevan un refuerzo orgánico se acoplan a la matriz utilizada en forma de fibras o partículas.

1.3.1.1. Fibras orgánicas

Las fibras están formadas por miles de filamentos cada uno con un diámetro aproximado de entre 5 a 10 micrones las cuales pueden ser producidas en máquinas industriales o de forma natural. Los materiales compuestos con fases dispersas en forma de fibras son los más importantes, ya que la mayoría de estos alcanza una elevada resistencia, rigidez y baja densidad. Las propiedades de estos materiales compuestos dependen de su longitud, tamaño y orientación de las fibras dentro de la matriz [3].

Actualmente se utiliza materiales más económicos y de menor impacto al medioambiente, por ello existe prioridad en el uso de fibras naturales como el lino, fibra de coco, o fibra del lirio. Al utilizar este tipo de fibras vegetales se reduce la contaminación al medio ambiente y se fabrica materiales más ecológicos. Estas fibras naturales pueden estar distribuidas dentro de una matriz natural al azar o siguiendo ciertas direcciones dependiendo de la geometría de la pieza [3].

1.3.1.2. Partículas orgánicas

Los materiales compuestos pueden estar formados por un refuerzo en forma de partículas y existen dos tipos, partículas grandes y pequeñas. Este tipo de partículas se puede obtener de fibras, realizando un proceso de molido y posteriormente tamizando para obtener partículas homogéneas. El grado de mejoramiento de las propiedades mecánicas depende de la adhesión matriz-refuerzo; las partículas no constituyen un refuerzo eficiente desde el punto de vista de las propiedades mecánicas pero este tipo de refuerzo ayuda a mejorar otro tipo de propiedades en el material [3].

Cuando las partículas son grandes la interacción matriz-partícula no se puede describir a nivel atómico o molecular sino mediante mecánica clásica. Para tener mejores propiedades las partículas deben ser más pequeñas y estar distribuidas lo más uniformemente posible dentro de la matriz; también se debe tener en cuenta la proporción de partículas dentro de la matriz pues mayor cantidad de partículas modifica las propiedades mecánicas del compuesto. Mientras la matriz soporta la mayor parte de las cargas las pequeñas partículas dispersas dificultan o impiden el desplazamiento de dislocaciones; lo cual impide la deformación plástica de tal manera que aumenta el límite elástico, resistencia a la tracción y la dureza [3].

1.4. Materiales compuestos con matriz polimérica y refuerzos orgánicos.

La matriz polimérica es también conocida como matriz orgánica o de plástico; sus principales características son su baja densidad y resistencia mecánica, alta tenacidad y resistencia a la corrosión, baja resistencia mecánica, bajo costo y facilidad de moldeo en la aplicación de materiales compuestos. Para utilizar este tipo de matriz se debe tener en cuenta su humedad relativa, temperatura de trabajo y la radiación solar [3].

1.4.1. Clasificación de matrices poliméricas

Las matrices poliméricas se clasifican según su respuesta mecánica frente a temperaturas, lo que las divide en tres subgrupos (Figura 1.3).

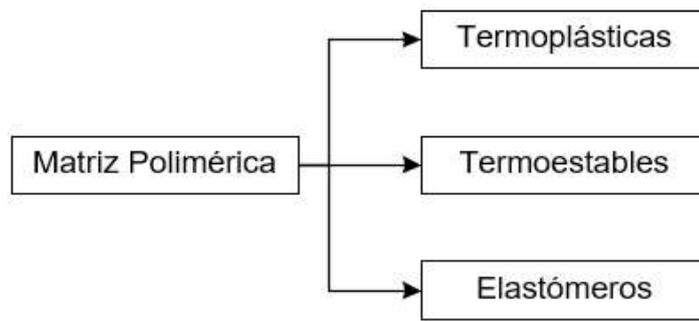


Figura 1.3. Clasificación de las matrices poliméricas.
(Fuente: Propia).

1.4.1.1. Termoplásticos

Son materiales denominados polímeros lineales, que se caracterizan por la fuerza de unión entre cadenas; a esta fuerza se la denomina fuerzas de Van Der Waals. La característica fundamental de este tipo de polímeros es que al elevar su temperatura el material se ablanda y mientras se enfría se endurece; este tipo de proceso se puede aplicar simultáneamente sin degradar al polímero. Los termoplásticos son materiales repetitivamente blandos y dúctiles [12].

1.4.1.2. Termoestables

Son materiales que contienen cadenas largas de polímero que están entrelazadas en una organización tridimensional; esta estructura se convierte en un enlace covalente muy fuerte al momento de realizar la polimerización; por lo que químicamente constituyen una estructura rígida lo cual hace que al aumentar la temperatura se endurezca y no se ablande [12] [13].

1.4.1.3. Elastómeros

Los elastómeros son de la familia de los polímeros amorfos que tienen la capacidad de deformarse en gran cantidad cuando se somete a esfuerzos relativamente bajos. Algunos elastómeros son capaces de deformarse hasta un 500% de su tamaño y después regresar a su estado natural, estos polímeros son blandos y tienen un bajo módulo de elasticidad. La estructura de los elastómeros es muy retorcida y desordenada, cuando se aplica un esfuerzo las moléculas se alinean como para poderse cristalizar [12] [13].

1.4.2. Materiales compuestos con matriz polimérica

Este tipo de matriz es la más usada para la fabricación de materiales compuestos con fibras orgánicas debido a su bajo costo y fácil uso. Los materiales compuestos utilizan matrices termoestables y termoplásticas [14].

Las matrices termoestables son aquellas que sufren una serie de reacciones químicas conocidas como curado o reticulación, dando lugar a un producto rígido, insoluble e infusible. La obtención de matrices termoestables se da en dos etapas: en la planta química se polimeriza parcialmente el

monómero formando cadenas lineales y en la planta de producción se completa la reticulación bajo calor y presión [14]. Este tipo de matrices presentan las siguientes características:

- Son fáciles de procesar antes del curado debido al bajo peso molecular de las resinas precursoras o pre-polímeros.
- Debido a la formación de reticulación son más tenaces.
- Son más frágiles que las termoplásticas.

Las matrices termoplásticas no tienen uniones permanentes entre cadenas porque no reticulan. El procesamiento para este tipo de matrices consta de una fase de calentamiento para ablandar el material y realizar el moldeo y una fase de enfriamiento posterior para endurecerlo. Estas matrices presentan las siguientes características:

- Son más difíciles de procesar ya que deben tener un alto peso molecular para presentar buenas propiedades mecánicas.
- Se pueden reciclar ya que se reblandecen al calentar y vuelven a la forma sólida al enfriarlos.

1.5. Métodos de procesamiento de los compuestos de matriz polimérica con refuerzos orgánicos.

En el procesamiento de materiales compuestos se emplean algunos lineamientos de producción para obtener un material adecuado y sin fallas; se utilizan equipos los cuales pueden ser automáticos, semiautomáticos y manuales, dependiendo del material a procesar. Previamente al proceso se debe tener en cuenta las variables de trabajo tanto de la materia prima como de los equipos a utilizar.

1.5.1. Métodos de procesamiento.

Para el proceso de fabricación de materiales compuestos es de gran importancia conocer el método con el que se obtendrá un material adecuado, mismo que proporcione propiedades homogéneas que satisfagan la necesidad requerida por los usuarios. Se tendrá en cuenta el costo de fabricación del material, siendo importante mantenerse entre 50 y 60 por ciento del costo final, por lo que es necesario seleccionar el método adecuado y de menor costo. Es preciso tomar en cuenta la matriz y refuerzo que se van a procesar y las aplicaciones finales del producto y en función de las hojas técnicas de los equipos verificar las ventajas y desventajas en la producción del material. Los procesos más comúnmente utilizados en la obtención de materiales compuestos termoestables y termoplásticos son: moldeo por aspersion, extrusión, inyección, pultrusión, moldeo por compresión, estratificación manual y moldeo por transferencia de resina [3].

1.5.1.1. Moldeo por estratificación manual

Este método de procesamiento es el más antiguo y simple para obtener materiales compuestos con matriz polimérica termoestable. Las resinas termoestables son de fácil procesamiento y existe una buena impregnación del refuerzo dentro de la matriz, dado que esta se encuentra en estado líquido a una temperatura ambiente. Las matrices más usadas para este proceso son: poliésteres, resinas epóxicas y fenólicas. Estos materiales son usados por su bajo costo y se complementan con reactivos para que las moléculas se puedan polimerizar adecuadamente. Las fibras que se usan en este proceso son fibras cortas, continuas, tejidas o no tejidas en un porcentaje de volumen máximo del 40%. La fibra más utilizada es la fibra de vidrio por su bajo costo [3], las etapas de proceso por estratificación manual son las siguientes:

- Tener un molde adecuado y agente de desmoldeo para retirar la pieza final sin daños.
- Aplicar el gelcoat con una pistola de aspersión o mediante un rodillo en forma manual.
- Curar el gelcoat para aplicar unas capas de refuerzo y posteriormente colar la resina catalizada sobre la capa de refuerzo para tener un mejor acoplamiento en la matriz, eliminando el aire atrapado en el material.
- Dejar que el material se cure a la temperatura ambiente este tiempo depende del catalizador que se aplica.
- Retirar la pieza del molde.

Las ventajas de este proceso son la simple operación, facilidad para la fabricación de piezas de diferentes tamaños, uso de alto contenido de refuerzo con materias primas baratas y bajo costo de fabricación debido a que no se utilizan máquinas para el proceso ni aplicaciones de calor. Una de las desventajas de este proceso es que no se puede tener un espesor uniforme, además se necesita alta precisión de operación del operador; no se puede producir piezas a gran escala y el inconveniente más importante es que las resinas son tóxicas y perjudican al medioambiente [3].

1.5.1.2. Moldeo por aspersión

Este proceso es similar al anteriormente mencionado con la diferencia que emplea una pistola de aspersión que coloca las fibras cortas y la resina simultáneamente sobre un molde; este proceso no requiere de calor ni de presión. El polímero más usado en este proceso es la resina poliéster, la cantidad del refuerzo a emplearse puede encontrarse entre 20 y 40% en peso; la fibra que más se usa es la fibra de vidrio en forma de hilo continuo, también se emplean otros materiales como el gelcoat para tener un mejor acabado en las piezas [3]. El proceso típico para el moldeo por aspersión es el siguiente:

- Tener un molde adecuado y agente desmoldeo para retirar la pieza final sin daños.
- Aplicar una capa de gelcoat, dejar curar a temperatura ambiente.

- Colocar la resina y el refuerzo con ayuda de una pistola de aspersión sobre el molde siguiendo un patrón que permita un espesor uniforme.
- Realizar el laminado con rodillos manualmente para permitir que el refuerzo se impregne y al mismo tiempo lograr un espesor uniforme de la pieza.
- Colocar el refuerzo en las partes deseadas para conseguir mayor resistencia.
- Una vez obtenido el espesor adecuado, dejar que se cure por completo a temperatura ambiente durante 2 o 4 horas dependiendo de la formulación de la resina.
- Retirar la pieza del molde

Este tipo de proceso se emplea en la fabricación de piezas donde la resistencia no es un factor primordial, en cuanto a equipos se utilizan pistolas de mezclado interno y pistolas de mezclado externo.

1.5.1.3. Extrusión

Es un método por el cual el material es expulsado a través de una boquilla con forma predeterminada. Este proceso se aplica en la industria plástica con polímeros termoplásticos para la obtención de piezas de sección transversal determinada dependiendo de la forma de la boquilla. Los equipos más comunes para este proceso son las extrusoras de tornillo; las cuales pueden ser de tornillo simple o tornillo múltiple y a su vez co-rotatorios o de rotación opuesta. También existen extrusoras de pistón y émbolo en las cuales el material es empujado por acción del émbolo [3]. Los pasos para el trabajo de una extrusora de tornillo son los siguientes:

- Ajustar los parámetros de la extrusora (velocidad de alimentación, velocidad del tornillo principal, temperatura y presión) para iniciar el proceso.
- Alimentar el material en forma de gránulos o pellets a través de una tolva de alimentación.
- Transportar el material por el tornillo principal donde se funde por la acción de un sistema de calentamiento y se mezcla para obtener un material homogéneo.
- Pasar el material fundido a través de una boquilla que da la forma a la pieza extruida.
- Enfriar la pieza.

Para materiales compuestos se usa extrusoras de doble tornillo debido a su alta capacidad de mezclado. El refuerzo se alimenta en forma de fibras cortas o polvos conjuntamente con la matriz lo que permite una distribución homogénea [3].

1.5.1.4. Compresión

Este proceso se deriva del estampado de placas metálicas. Los moldes empleados son de tipo macho/hembra con un diseño simple; de tal forma que sea fácil aplicar la presión necesaria. Este tipo de proceso se utiliza para polímeros termoestables y termoplásticos,

consiste en intercalar láminas de matriz y refuerzo de forma pre impregnada en un molde [3]. Los pasos para este proceso son los siguientes:

- Calentar las fibras y el polímero termoplástico, para colocarlos en un molde que debe contener agentes desmoldantes; la cantidad de material a utilizar depende del espesor de la pieza.
- Cerrar el molde y aplicar presión con una prensa calefactora hasta que el material alcance la temperatura de fusión.
- Una vez que el material alcanza el equilibrio térmico se aplica una presión de moldeo hasta que el plástico se encuentre en estado fundido.
- Después del tiempo requerido para el moldeo se lleva a cabo el enfriamiento en el cual el molde se enfría por medio de un sistema de refrigeración a presión constante para evitar la recuperación elástica del material.
- Retirar la pieza del molde.

Los moldes para este tipo de proceso son de acero inoxidable o aluminio por ser materiales que facilitan la transferencia de calor lo que mejora el proceso. La fabricación de piezas con superficies lisas por este método se da a gran escala [3].

1.5.1.5 Inyección

Este es un proceso que se caracteriza por tener etapas cíclicas en las cuales el polímero fundido es transportado a un molde cerrado donde se solidifica dependiendo de la forma del molde. Este procesamiento se aplica a polímeros termoplásticos o materiales compuestos con matriz termoplástica. En este proceso para la fabricación de materiales compuestos se debe tener el material mezclado previamente con otro tipo de proceso y tener pellets de aproximadamente 10mm de longitud lo cuales se alimentan en el equipo por medio de una tolva; también se puede acondicionar el refuerzo en el molde para posteriormente inyectar la matriz o una mezcla de material. Las fibras más usadas para este proceso es la fibra de carbono y kevlar, pero en la actualidad se emplea también fibras naturales. Se deben regular los parámetros del proceso para obtener las piezas finales en buenas condiciones, estos parámetros son: velocidad, temperatura y presión, el tipo de maquinaria es similar al de una extrusora [3]; las etapas de procesamiento se mencionan a continuación:

- Secar previamente los pellets de material para evitar humedad y que el equipo no presente problemas durante su funcionamiento.
- Fijar los parámetros de funcionamiento del equipo y alimentar el material por medio de una tolva.
- Los pellets son transportados por un tornillo y fundidos en una cámara; después el polímero fundido es inyectado a las cavidades del molde usando presión.

- El molde es enfriado a una temperatura menor a la de fusión del material; lo que permite la solidificación del material. Esta temperatura debe ser controlada para evitar distorsiones en la pieza final.
- Después de enfriar se procede al desmoldeo de las piezas.

Una de las ventajas de este proceso es que permite la producción de grandes volúmenes y el proceso puede ser automatizado en ciclos cortos de producción abaratando costos. También es posible crear piezas complejas con pesos en un rango de 5 a 85 gramos; el acabado superficial es muy bueno en las piezas finales. Una de las desventajas es la inversión del equipo, la puesta en marcha y el mantenimiento del mismo [3].

1.5.1.6. Pultrusión

Este proceso es continuo con un alto grado de automatización y se utiliza para grandes volúmenes de producción; generalmente se emplea para polímeros termoestables y en menor cantidad para termoplásticos. El proceso consiste en impregnar fibras de refuerzo en la matriz polimérica y hacer circular por una boquilla con una velocidad constante. Se emplean refuerzos de filamentos continuos de fibra de vidrio, fibra de carbono, entre otros, también se emplean refuerzos en forma de tejidos y no tejidos para aumentar la resistencia mecánica [3]. Las etapas de este proceso son las siguientes:

- Se coloca el refuerzo en carretes y se lo sumerge en un baño de resina hasta obtener una viscosidad adecuada para la impregnación.
- Después de la impregnación el conjunto matriz-refuerzo es estirado por medio de una boquilla sometida a calentamiento proporcionando así la temperatura de curado, mismo que se produce a medida que atraviesa el molde.
- Finalmente, el material obtenido se corta de acuerdo a la necesidad.

Es un método muy sencillo de aplicar, las velocidades de aplicación para la producción se encuentran entre 0,6 a 3 m/min. Las materias primas son de bajo costo; además la presión y temperatura de trabajo son bajas lo que reduce el costo de producción. Las piezas pueden ser de cualquier longitud [3].

1.5.1.6. Transferencia de resina

Este proceso llamado transferencia de resinas (RTN) o moldeo de transferencia líquida, consiste en la inyección de polipropileno termoestable en un molde cerrado y es similar al proceso de inyección; el refuerzo se lo coloca en el interior de un molde y la resina puede ser inyectada por uno o varios puertos dependiendo del molde y del tamaño de la pieza. En este proceso se debe tener en cuenta la viscosidad de la resina que debe ser baja para mantener los requerimientos de presión, facilitando el mojado del refuerzo. Se debe seleccionar una

resina cuyo curado se realice a temperatura ambiente. El refuerzo que se utiliza son fibras sintéticas; generalmente de carbono y fibra de vidrio en forma continua, tejida o no tejida [3]. Los pasos para el desarrollo de este proceso son los siguientes:

- Aplicar agentes desmoldantes en un molde y colocar los refuerzos secos, dependiendo de la orientación en la mitad del molde.
- Cerrar el molde y aplicar la resina a baja presión; para evitar que se desplace el refuerzo. La aplicación de la presión se realiza por medio de prensas hidráulicas o neumáticas.
- En caso que se requiera se aplica un calentamiento al molde para obtener temperaturas de curado.
- Dejar durante un tiempo para que se complete el curado y posteriormente retirar la pieza del molde.

Los moldes pueden tener uno o varios puntos de inyección dependiendo del tamaño de la pieza que se desea y por lo general son fabricados de aluminio o acero. Por lo general el ingreso de la resina se hace por la parte posterior del molde; se debe tener en cuenta la presión requerida por el proceso para considerar el espesor del molde y proporcionarlo de la rigidez adecuada. Una de las ventajas de este tipo de proceso es que no requiere una inversión muy alta; la temperatura y presión son menores que las empleadas en procesos de extrusión o inyección, lo cual reduce costos de fabricación; se pueden fabricar piezas muy complejas dependiendo del tipo de molde. Al ser un proceso de molde cerrado permite un mejor ambiente de trabajo evitando emisiones de solventes. Para piezas complejas se realiza experimentación de prueba y error o simulación para asegurar una buena impregnación en el refuerzo [3].

2. MATERIALES Y METODOS

En este capítulo se presentan los materiales utilizados, así como el procedimiento y parámetros tomados en cuenta al momento de procesar y obtener el biocompuesto. Se muestran las propiedades principales de cada material según lo expuesto en cada ficha técnica.

Posteriormente se describe el procedimiento para la caracterización del biocompuesto apegado a la bibliografía revisada; esto abarca parámetros de velocidad, temperaturas, etc. Además, se detalla el procedimiento que se debe realizar sobre el material para caracterizarlo a través de distintos ensayos mecánicos de acuerdo a los lineamientos expuestos en las normas ASTM.

En cada etapa de procesamiento y caracterización del biocompuesto se describen los equipos, herramientas utilizadas y las diferentes variables que deben ser controladas en cada uno de los equipos.

2.1. Materiales utilizados

Para la caracterización del biocompuesto, el cual consta de matriz polimérica y refuerzo orgánico se determinó la utilización de los siguientes materiales.

2.1.1. Matriz

Como matriz se utiliza Polipropileno homopolímero de marca PETROQUIM en donde la variedad seleccionada es PH1310; material ideal para trabajar en procesos de extrusión e inyección. En la Figura 2.1 se muestra la variedad de polipropileno utilizada.



Figura 2.1. Polipropileno homopolímero PETROQUIM PH1310.
(Fuente: Propia)

En la tabla 2.1 se muestran las propiedades del polipropileno las cuales se deben tener en cuenta para su procesamiento.

Tabla 2.1. Propiedades Polipropileno (PH1310)

Propiedad	Norma ASTM	Unidades	Valor
Índice de fluidez 2,16 kg/230 °c	D-1238/95	g/10 min	13,00
Temperatura de ablandamiento vicat (1 kg)	D-1525/97	°C	154,00
Temperatura de deformación térmica (455 kPa)	D-648/97	°C	95,00
Resistencia al impacto IZOD a 23 °C	D-256/93	J/m	34,00
Resistencia a la tracción	D-638/97	MPa	34,00
Elongación	D-638/97	%	12,00
Módulo de elasticidad en flexión	D-790/97	MPa	1500,00

(Fuente: Propia)

2.1.2. Refuerzo

Como refuerzo se utiliza cascarilla de arroz, obtenida en una de las arroceras del país, ubicadas en Babahoyo, provincia de Los Ríos, la variedad utilizada es la INIA 415 (Figura 2.2). La materia prima se obtuvo una vez separada del grano de arroz y es almacenada en sacos de yute. Hablar de las propiedades exactas de la cascarilla de arroz es algo trivial, debido a las distintas condiciones en las cuales cada lote de arroz crece. Sin embargo, se establece el peso promedio de la cascarilla de arroz entre 2,94 y 3,56 mg [15]. La composición de la cascarilla de arroz es detallada en la Tabla 2.2. [16].

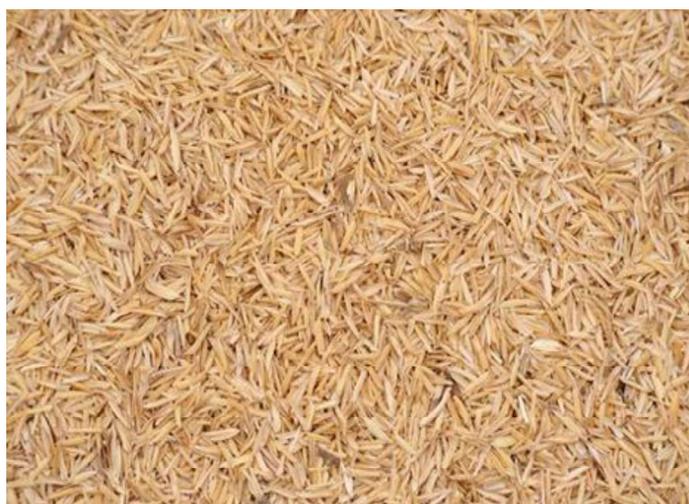


Figura 2.2. Cascarilla de arroz.
(Fuente: Propia)

Tabla 2.2. Principales propiedades de la cascarilla de arroz.

Análisis próximo	%	Análisis de los componentes	%
Volátiles	59,00	Celulosa	34,30
Humedad	7,60	Hemicelulosa	29,40
Cenizas	19,10	Lignina	19,30
Otros	14,30	Cenizas	17,00

(Fuente: Tipanluisa et al. (2015) [16])

2.1.3. Compatibilizante

El compatibilizante es un aditivo utilizado para lograr una mejor adhesión entre la matriz de naturaleza hidrófoba y el refuerzo de comportamiento hidrófilo; se utilizó polipropileno maleizado (MAPP) de marca DuPont Fusabond y variedad P613 como compatibilizante; en la ficha técnica correspondiente (Anexo II) se especifica el punto de fusión establecido en 162°C con un índice de fluidez que va desde los 49 g/10 min hasta los 120 g/10 min, a una temperatura de 190°C.

2.2. Procedimiento experimental

La caracterización del material y el procesamiento del mismo son presentados detallando cada etapa completada en el proceso de la obtención del nuevo material. Se incluyen los equipos utilizados, los procedimientos realizados y los ensayos mecánicos y térmicos aplicados.

Para el desarrollo del biocompuesto, en primer lugar, se procede a realizar la molturación de la cascarilla de arroz y de esta forma seleccionar el tamaño adecuado de partícula y obtenerlo mediante tamizado. Una vez obtenido el refuerzo se procede a realizar un secado previo a la extrusión.

Para la obtención del biocompuesto se realiza una extrusión para las composiciones sin compatibilizante (MAPP), mientras que para los que contienen compatibilizante (MAPP) se realiza una segunda extrusión en donde se agrega el compatibilizante (MAPP).

Al obtener los filamentos de biocompuesto desde la extrusora se procede a peletizar el material y secarlo; el cual es un proceso previo y obligatorio antes del moldeo por inyección. Mediante el moldeo por inyección se logra obtener las probetas para la caracterización del nuevo material descartando cualquier probeta que posea defectos y continuando con la aplicación de los respectivos ensayos mecánicos y térmicos. En la Figura 2.3 se muestra el proceso para la caracterización del material mediante un diagrama de flujo.

2.2.1. Planteamiento experimental para obtener el biocompuesto

Para el inicio de la investigación es necesario determinar composiciones de material, es decir porcentajes de matriz, refuerzo y compatibilizante; por ello es importante el apoyo de revisiones bibliográficas, para así conocer las posibles limitaciones y ventajas al momento de realizar el procedimiento experimental, tomando en cuenta temperaturas de trabajo, tamaños de partícula e incluso el adicionamiento o ausencia de compatibilizante (MAPP) en el material procesado.

2.2.1.1. Tamaño de grano del refuerzo.

El tamaño de grano es un factor determinante en varios casos; debido a que este aspecto puede influir en las propiedades finales del material. Como en el caso de varios materiales ferrosos en los cuales un tamaño de grano fino permite lograr la obtención de un material resistente y duro; pero con menos plasticidad [17]. Con antecedentes de este tipo es pertinente determinar un tamaño de grano adecuado para lograr obtener mejores resultados. El estudio realizado por Isa et al. (2009) [18] señala que es posible determinar el tamaño de grano adecuado para el proceso del biocompuesto; es así que, si se considera un tamaño de grano demasiado fino tiende a degradarse más fácilmente a temperaturas altas por lo que se selecciona partículas mayores a 250 μm ; por otro lado, un tamaño de grano grueso proporciona menor fluidez; consecuentemente estas partículas no deben superar las 500 μm . Por lo tanto, resulta acertado seleccionar un tamaño de grano entre 250 a 500 μm , para el procesamiento efectivo de la cascarilla de arroz.

2.2.1.2. Presencia de compatibilizante

El compatibilizante en muchos casos es un elemento importante al momento de procesar materiales compuestos con matriz polimérica y refuerzo orgánico, esto se debe a la naturaleza de ambos elementos, teniendo por un lado la matriz polimérica con un comportamiento hidrófobo y por otro lado el refuerzo lignocelulósico de naturaleza hidrófila. Esto hace que exista un problema al momento de realizar una combinación química logrando una posible mala adhesión, por lo que el refuerzo sobre la matriz podría resultar no tan efectivo [19].

En el estudio realizado por A. Bilal (2015) [20] se determinó que la cantidad adecuada a utilizar en biocompuestos que involucren a la cascarilla de arroz está en el orden del 3% en peso. Esta cantidad de compatibilizante (MAPP) permite la reducción de la absorción de agua e incluso mejora la resistencia a la tracción de los biocompuestos. Sin embargo, existen casos en donde se demostró que la ausencia de compatibilizante (MAPP) en materiales compuestos no perjudica mayormente sus propiedades finales. Este comportamiento también se evidenció en el estudio realizado por Leal et al (2015) [21].

Dado que en el Ecuador no existe una amplia oferta en lo que respecta a agentes compatibilizantes y la dificultad de adquirirlos en el exterior, se considera dos opciones: con y sin uso de compatibilizante (MAPP) en las composiciones de material a ser procesado.

2.2.1.3. Nomenclatura del biocompuesto

Para una mejor identificación de cada material a lo largo del procesamiento del biocompuesto se ha elegido la nomenclatura detallada en la siguiente tabla:

Tabla 2.3. Nomenclatura utilizada en el biocompuesto.

Símbolo	Definición
PP	Polipropileno PH1310
MAPP	Agente compatibilizante, polipropileno maleizado
RH	Cascarilla de arroz (Rice Husk)
X	Partícula de cascarilla de arroz

(Fuente: Propia)

2.2.1.4. Composiciones en peso

Las composiciones seleccionadas van en el orden del 5, 15 y 25 % de refuerzo en lo que respecta a la adición de la cascarilla de arroz (RH) en matriz de polipropileno (PP). Estas composiciones son recomendadas por el operario de la extrusora, así como también en el estudio realizado por Bilal (2015) [20] en los que se aconseja trabajar con porcentajes de refuerzo bajos, por posibles problemas de fluidez en el proceso de extrusión; además, en cada composición se prescinde y adiciona el 3 % de compatibilizante (MAPP). La composición adicional está conformada en su totalidad de polipropileno en estado puro, sirviendo como referencia para la caracterización de material obtenido. La Tabla 2.4 muestra todas las posibles combinaciones empleadas para la caracterización de este biocompuesto.

Tabla 2.4. Composiciones previstas del biocompuesto.

Muestra	Nomenclatura	PP (%)	RH (%)	MAPP (%)	Tamaño de partícula (X)
1	PP100	100,00	-	-	-
2	PP95-RH5	95,00	5,00	-	250 < X < 500 µm
3	PP92-RH5-MAPP	92,00	5,00	3,00	250 < X < 500 µm
4	PP85-RH15	85,00	15,00	-	250 < X < 500 µm
5	PP82-RH15-MAPP	82,00	15,00	3,00	250 < X < 500 µm
6	PP75-RH25	75,00	25,00	-	250 < X < 500 µm
7	PP72-RH25-MAPP	72,00	25,00	3,00	250 < X < 500 µm

(Fuente: Propia)

2.2.2. Procesamiento del biocompuesto

La fabricación del biocompuesto con las distintas combinaciones implica varios procesos, como el secado del refuerzo, mezclado de materiales constituyentes, peletizado, moldeo por inyección, etc. A continuación, se detalla cada uno de ellos.

2.2.2.1. Selección del refuerzo

El proceso empieza con la selección de la cascarilla de arroz (RH); en este caso al momento de la adquisición de la cascarilla de arroz en la piladora se elige aquella que se encuentre lo más seca posible. Una vez que se ha obtenido el producto este debe ser almacenado en un lugar seco para evitar que el refuerzo absorba humedad.

2.2.2.2. Molturación

Una vez obtenida la cascarilla de arroz se procede con su transformación para obtener partículas uniformes. Para ello se utiliza un molino de cuchillas rotatorias de marca Thomas Wiley (Figura 2.4) que acoplado a un tamiz permite la obtención de partículas por debajo de 1mm. El molino utilizado pertenece al laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería Química de la Escuela Politécnica Nacional.



Figura 2.4. Molino de cuchillas rotatorias.
(Fuente: Propia)

La cantidad de material de refuerzo procesado fue alrededor de 20 Kg, de forma que se obtenga una cantidad considerable de material de refuerzo y no exista la posibilidad de escasez en la etapa de extrusión.

2.2.2.3. Tamizado

El tamizado es una parte importante en el proceso de producción del biocompuesto para obtener un material particulado uniforme en distintos tamaños de partícula, dependiendo de la malla que se utilice. Anteriormente se había definido que el tamaño adecuado de partícula se encuentra en el rango de 250 a 500 μm , por lo que de acuerdo a la norma ASTM E11 los tamices empleados son el número 35 y 60; cuya apertura permite la obtención de partículas de 500 y 250 μm de tamaño respectivamente. Las características de cada tamiz se encuentran detalladas en el Anexo V y en la Figura 2.5 se muestra uno de los tamices utilizados en el proceso.



Figura 2.5. Tamiz N° 35, según ASTM E11.
(Fuente: Propia)

La tamizadora de marca Karl Kolb (Figura 2.6) utiliza la vibración como principio de funcionamiento. Para su puesta en marcha fue necesario configurar una torre de seis tamices, los cuales se ordenan desde la parte superior a la inferior; los tamices utilizados fueron los números 30, 35, 40, 60, 80 y la base, tal como se muestra en la Figura 2.6. El tamizado del material se realizó por 10 minutos y posteriormente todo el material entre el tamiz 35 y el tamiz 60 fue almacenado para su posterior procesamiento. La tamizadora Karl Kolb pertenece al Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería Química de la Escuela Politécnica Nacional.



Figura 2.6. Tamizadora.
(Fuente: Propia)

2.2.2.4. Secado previo a la extrusión

El secado del refuerzo es importante antes de realizar la extrusión para disminuir la cantidad de humedad absorbida anteriormente, puesto que podría influir en la adhesión entre la matriz y el refuerzo del biocompuesto. En estudios realizados por Leal et al. (2019) [21] y Yang et al. (2004) [22] se sugiere un tiempo de secado de 24 horas antes de realizar el proceso de extrusión, a una temperatura promedio de 80°C. La estufa de marca Venticell (Figura 2.7) perteneciente al Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros (CIAP) de la Escuela Politécnica Nacional fue utilizada para el secado del refuerzo.



Figura 2.7. Estufa Venticell del CIAP.
(Fuente: Propia)

Para el secado del material se procedió a distribuir las partículas de cascarilla de arroz en bandejas de aluminio (Figura 2.8) al ser ideales para trabajar en la estufa; con las condiciones de temperatura y tiempo establecidos en la estufa inicia el secado del material y una vez concluido el proceso se almacena el material en fundas plásticas herméticas para su posterior uso en el proceso de extrusión.



Figura 2.8. Cascarilla de arroz (RH), lista para el secado.
(Fuente: Propia)

2.2.2.5. Extrusión

El proceso de extrusión de polímeros es un procedimiento mecánico en el cual se somete a un material a fluir continuamente a través de una boquilla mediante la acción del empuje a presión y temperatura predeterminada. En esta etapa se realiza la mezcla de la matriz, el refuerzo y el compatibilizante (MAPP) en el equipo de extrusión marca XINDA, modelo PSHJ-35, perteneciente al Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros (CIAP) de la Escuela Politécnica Nacional.

2.2.2.5.1. Extrusora XINDA PSHJ-35

La extrusora XINDA PSHJ-35 (Figura 2.9) es un equipo de doble husillo segmentado con un diámetro de 35 mm que se configura fácilmente, lo que permite el procesamiento de cantidades relevantes de material.



Figura 2.9. Extrusora XINDA PSHJ - 35.
(Fuente: Propia)

El equipo de extrusión consta de distintas unidades que permiten la transformación del polipropileno (PP) con cascarilla de arroz (RH) y el compatibilizante (MAPP) en un biocompuesto de características y propiedades distintas a las de sus componentes iniciales. Entre las principales unidades a destacar se mencionan las siguientes.

- Panel de control Siemens: Este panel se encarga de accionar, regular y controlar cada parámetro que participa en el proceso de extrusión, tal como como: velocidad del husillo, temperaturas en las zonas de calentamiento, activación o desactivación de los dosificadores principal y/o secundario, etc.
- Tolva de alimentación: El equipo de extrusión posee una tolva principal y otra secundaria; sus respectivos dosificadores se accionan desde el panel de control según las condiciones de trabajo requeridas. La tolva principal se encuentra en línea con el husillo co-giratorio, mientras que la tolva secundaria se ubica perpendicularmente hacia el mismo.
- Extrusora: La extrusora posee doble husillo y siete zonas de calentamiento; en esta sección se produce el ingreso de los materiales, transportación, precalentamiento, plastificación, mezcla y salida del biocompuesto. Las temperaturas son establecidas de acuerdo a las características técnicas de cada material.
- Bomba de vacío: la bomba de vacío permite la extracción de vapores generados durante el proceso de extrusión
- Bomba de agua: la bomba de agua se encarga de controlar la temperatura en la extrusora.
- Tina de enfriamiento: Es un recipiente lleno con agua que se encarga de enfriar los filamentos extruidos de biocompuesto; ya que se obtienen de la extrusora a elevadas temperaturas, además posee rodillos calados que se ubican bajo el agua que se encargan de guiar a los filamentos del biocompuesto hacia el secador de aire y al peletizador.
- Secador de aire: Elimina la humedad de los filamentos del biocompuesto, una vez que pasa por la tina de enfriamiento.
- Peletizador: Se encarga de cortar los filamentos del biocompuesto, en forma de pellets, para que puedan ser utilizados en procesos posteriores.

La extrusora Xinda PSH-35 es un equipo moderno y versátil, las principales características técnicas del equipo se encuentran detalladas en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Características técnicas de extrusora XINDA PSHJ-35.

Marca y modelo	XINDA PSHJ – 35 Extrusora de doble tornillo, co-giratoria de tipo dividido
Numero de husillos	Doble husillo, tornillo gemelo
Diámetro de husillo	35 mm
Dirección de husillos	Co-giratorio
Relación L/R	40:1
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: L.Parra (2011) [23], Anexo IV)

2.2.2.5.2. Condiciones de procesamiento

Las variables a considerar en el procesamiento del biocompuesto son el perfil de temperaturas de las siete zonas de calentamiento de la extrusora, la velocidad del husillo co-giratorio y las velocidades del dosificador de la tolva principal y secundaria; los cuales son controlados manualmente desde el panel de control.

Para la determinación de las temperaturas óptimas en cada zona de calentamiento es necesario conocer la temperatura de degradación y trabajo óptimo de cada material y de este modo lograr definir un perfil adecuado para la mezcla del material. Tomando como punto de partida las especificaciones técnicas del polipropileno mostrados en el Anexo I y como referencia los parámetros utilizados por Vizueta & Pilaguano (2017) [24] y Da Cunha (2010) [25] se establece un rango de temperaturas entre 165°C y 195 °C; por lo que se establece un perfil de temperaturas de 165, 170, 175, 180,185, 190, 195 °C distribuido en las siete zonas de calentamiento del equipo.

El perfil establecido no afecta a la cascarilla de arroz debido a que la temperatura de degradación de las partículas de cascarilla de arroz inicia alrededor de 250°C [15].

Posteriormente se determina la velocidad del husillo co-giratorio, la cual debe mantenerse constante para cada composición del material a procesar; de este modo las composiciones de biocompuesto pueden ser comparadas. La velocidad adecuada para el proceso se establece luego de realizar una inspección visual a los filamentos del material tomando en cuenta la calidad de los mismos, así como la habilidad al momento de manipular la producción del material; logrando definir la velocidad del husillo co-giratorio en alrededor de 45 RPM.

Para las diferentes composiciones del biocompuesto se debe trabajar con la velocidad de los dosificadores principal y secundario. En este caso se opta por mantener fija una cantidad en peso de material en ambos dosificadores durante un tiempo establecido y en función de mantener dicha cantidad de material se procede a variar la velocidad de los dosificadores ajustando la tasa de alimentación de material en cada uno; de tal forma que permita obtener la composición de matriz y refuerzo deseadas en el biocompuesto.

Posterior al enfriamiento, los filamentos de biocompuesto fueron recolectados y una vez que se ha procesado alrededor de 2 kg de material se da por terminada la extrusión de una composición; para iniciar el procesamiento de otra composición de biocompuesto con distintos porcentajes de matriz y refuerzo.

Al obtener las composiciones de biocompuesto requeridas se realiza un secado rápido con el fin de evitar una oxidación en las cuchillas del peletizador pues los filamentos pueden contener agua en su superficie; después de dicha etapa se procede a peletizar los filamentos de biocompuesto para un posterior procesamiento. Los pellets obtenidos se muestran en la Figura 2.10.



Figura 2.10. Pellets de biocompuesto.
(Fuente: Propia)

2.2.2.6. Secado previo a la inyección

El secado del biocompuesto es importante para disminuir la humedad absorbida en el proceso de extrusión y así evitar discontinuidades al obtener probetas en el proceso de inyección. La humedad es adquirida en el sistema de enfriamiento del proceso de extrusión, por ello es necesario establecer un secado previo al proceso de inyección. Las condiciones de secado son recomendadas por el operario del equipo de inyección; así como Isa et al. (2009) [18] en su estudio referente a compuestos obtenidos por inyección quien recomienda un tiempo de secado de 2 horas a una temperatura de 80°C.

El secado de los pellets del biocompuesto se realizó en una estufa Venticell (Figura 2.7) perteneciente al Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros (CIAP). Para el secado se distribuye el material en las bandejas de aluminio y una vez establecidas las condiciones de trabajo y con el material en el interior de la estufa se inicia el secado. La disposición de los pellets de biocompuesto para esta etapa se muestra en la Figura 2.11.



Figura 2.11. Pellets de biocompuesto, listo para el secado.
(Fuente: Propia)

Una vez finalizado el secado el material, este se almacena en fundas plásticas herméticas e inmediatamente se inicia el proceso de inyección. Cada vez que se realiza la inyección de una composición se debe secar el biocompuesto.

2.2.2.7. Inyección

La inyección de materiales es un proceso de manufactura en el cual el material fluye a través de un tornillo desde una tolva de alimentación hasta una boquilla de inyección por medio de la acción de la temperatura y la presión. Una vez en la boquilla de inyección el material ingresa en el interior de un molde que proporcionará al material la forma final. El equipo de inyección utilizado de marca MILACRON, modelo MT 55, pertenece al Laboratorio de Nuevos Materiales (LANUM) de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional.

2.2.2.7.1. Inyectora MILACRON MT55

La inyectora MILACRON MT55 (Figura 2.12) es un equipo versátil de la última década, apto para el procesamiento adecuado de polímeros y materiales compuestos con matriz polimérica; posee un motor de 15 HP que controla los sistemas hidráulicos.



Figura 2.12. Inyectora Milacron MT 55.
(Fuente: Fabricante)

La inyectora está compuesta de dos sistemas: el sistema de inyección y el sistema de apertura/cierre con una capacidad máxima de 50 toneladas.

El sistema de apertura/cierre tiene como objetivo desplazar el molde desde y hacia el punto de inyección del material de tal forma que al trasladar y contactar herméticamente con el punto fijo de inyección se podrá iniciar con la inyección del material considerando la presión y el tiempo específico; los cuales dependen del tipo de material a procesar. Una vez finalizado el proceso se desplaza el molde para obtener el material en su forma final. La inyectora posee un molde que provee probetas para los ensayos de tracción, flexión e impacto Izod, de acuerdo a las normas ASTM D638, D790 y D256, respectivamente.

El proceso de inyección inicia colocando los pellets del material en la tolva; posteriormente son desplazados por un tornillo a través de las cámaras de calefacción, es aquí donde el material se convierte en líquido para su correcto traslado por los ductos del equipo. El traslado continuo del material es controlado inicialmente por acción del tornillo y es almacenado en una cámara anterior a la boquilla de inyección, en este punto el desplazamiento del material pasa a ser controlado por la presión que ejerce el equipo; esta etapa es conocida como punto de transferencia de material. Mientras el material sigue almacenándose en la cámara de inyección el tornillo reduce su velocidad y se desplaza en dirección contraria a la boquilla de inyección. Una vez que el proceso de inyección finaliza, el tornillo retorna a sus condiciones iniciales de trabajo.

La ficha técnica del equipo utilizado se detalla en el Anexo III y sus características más importantes se muestran en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Etapas de inyectora MILACRON MT 55.

Marca y modelo	MILACRON MT 55
Tipo de tolva	Tolva con dosificador de tornillo sin fin
Sistema de calentamiento	Bandas calefactoras
Sistema de inyección	Inyección a 166 bar máximo.
Sistema de apertura/cierre	Dispositivo de rodillera a 50 toneladas máximo

(Fuente: Anexo III)

2.2.3. Caracterización del biocompuesto

2.2.3.1. Parámetros de extrusión

A lo largo del proceso de extrusión se definió un perfil de velocidades en los dosificadores principal y secundario, así como en el husillo co-giratorio de la extrusora, logrando realizar la extrusión de manera controlada.

Para determinar el perfil de velocidades se realizó pruebas de dosificación con polipropileno; al ser el material utilizado como matriz y presente en mayores porcentajes en peso dentro del biocompuesto, se logra obtener un valor de velocidad adecuado tanto en el dosificador principal, así como en el husillo co-giratorio de la extrusora. También se realiza pruebas de dosificación con la cascarilla de arroz particulada, para obtener valores de velocidad referenciales en el dosificador secundario. Los valores de velocidad referenciales de los dosificadores principal y secundario fueron ajustados dentro de un mismo intervalo de tiempo; de este modo, se procedió a ajustar las velocidades de dosificación, para obtener las composiciones deseadas. Las velocidades de dosificación se muestran en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7. Parámetros de extrusión

Composición	Velocidad del dosificador principal (rpm)	Velocidad del dosificador secundario (rpm)	Velocidad del husillo co-giratorio (rpm)
PP95-RH5	3,90	0,50	60,00
PP92-RH5-MAPP	4,20	0,45	60,00
PP85-RH15	3,40	0,90	60,00
PP82-RH15-MAPP	3,60	1,10	60,00
PP75-RH25	3,00	1,40	60,00
PP72-RH25-MAPP	3,00	1,47	60,00
PP Maleizado	4,10	0,45	60,00

(Fuente: Propia)

2.2.3.2. Parámetros de inyección

En el proceso de inyección del material se requiere establecer un perfil de velocidad, temperatura y presión en el equipo; de forma que estos parámetros permitan obtener probetas con acabado superficial óptimo y completas.

La inyectora perteneciente al laboratorio de nuevos materiales (LANUM) de la facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional tiene como antecedente haber trabajado con polipropileno similar al utilizado en esta investigación [24]; por lo cual los parámetros de trabajo serán similares.

Tabla 2.8. Perfil de temperaturas en la inyectora.

	Alimentación	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Boquilla
Temperaturas (°C)	56,00	183,00	184,00	186,00	190,00

(Fuente: LANUM)

Tabla 2.9. Parámetros de inyección.

Presión de inyección (Bar)	Tamaño de disparo (mm)	Velocidad de inyección (mm/s)	Tiempo de inyección (segundos)	Retrosucción (mm)
80,00	25,00	50,00	15,00	40,00

(Fuente: LANUM)

2.2.3.3. Ensayo de tracción

Para los ensayos de tracción se aplica la norma ASTM D638-14 la cual detalla distintos tipos de probetas, cada tipo de probeta se diferencia de otra por sus dimensiones. La inyectora del LANUM provee probetas del Tipo I, las dimensiones de una probeta del tipo I se muestran en la Figura 2.13 y la probeta obtenida se muestra en la Figura 2.14.

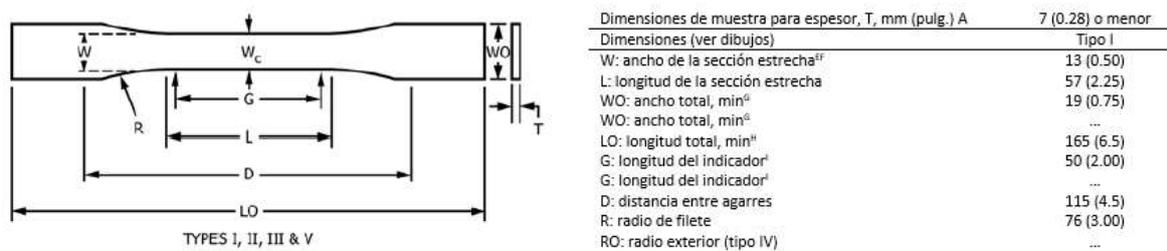


Figura 2.13. Dimensiones de la probeta de tracción tipo I, establecidas según norma ASTM D638-14.
(Fuente: ASTM D638-14)



Figura 2.14. Probeta de tracción del tipo I.
(Fuente: Propia)

Las probetas seleccionadas para los ensayos deben tener menos imperfecciones superficiales o defectos, de tal forma que al realizar el ensayo de tracción no existan factores que afecten a los valores obtenidos.

Para la ejecución de los ensayos de tracción se utilizó la máquina universal de ensayos de marca INSTRON perteneciente al Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros (CIAP). Es necesario configurar las mordazas del equipo, de manera que la probeta encaje correctamente dentro del límite de las mordazas; posteriormente se determina la velocidad de ensayo la cual se menciona en la norma ASTM-D638; en donde, para materiales rígidos y semirrígidos con probetas del tipo I, se recomienda utilizar velocidades de 5, 50 y 500 mm/min. Para el análisis de un material nuevo en probetas del tipo I se recomienda utilizar velocidades bajas; por lo que se establece realizar el ensayo a 50 mm/min. Una vez realizado el ensayo con dicha velocidad, se obtuvo resultados similares a los de la investigación realizada por D. Villamar (2013) [26].

La probeta debe ser colocada en las mordazas de la máquina universal de ensayos lo más paralelamente posible con respecto a sus límites; asegurarla y colocar el extensómetro en el cuerpo de la probeta, una vez determinadas las condiciones de trabajo el equipo inicia el ensayo de tracción. En la Figura 2.15 se observa la ejecución del ensayo de tracción y en la Figura 2.16 se muestra la probeta ensayada.

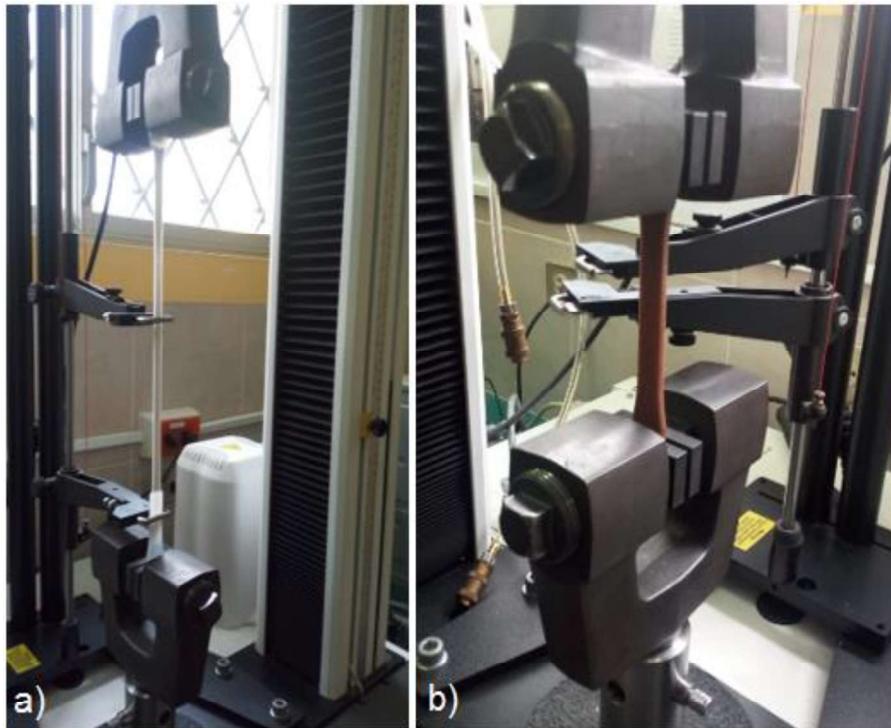


Figura 2.15. Ensayo de tracción a probeta del tipo I, a) Ensayo de tracción espécimen PP100, b) Ensayo de tracción espécimen PP92-RH5-MAPP.
(Fuente: Propia)



Figura 2.16. Probeta de tracción, a) ensayada, b) sin ensayar.
(Fuente: Propia)

La norma establece un número mínimo de probetas a las cuales se debe realizar el ensayo de tracción para que sea válido; en este caso al disponer de un material isotrópico se establece que se debe realizar el ensayo en al menos 5 probetas.

Finalizado el ensayo, los datos adquiridos permiten obtener por medio de cálculos el módulo de elasticidad en tracción y la resistencia a la tracción en cada composición de biocompuesto.

Para el cálculo de la resistencia a la tracción máxima se emplea la siguiente fórmula:

$$\sigma_{max}[MPa] = \frac{F [N]}{A [mm^2]} \quad (2.1)$$

En donde F es la fuerza máxima soportada en Newtons y A es el área transversal en milímetros.

Para la determinación del módulo de la elasticidad en tracción, la norma establece que se debe dividir la diferencia entre los esfuerzos en un intervalo de la primera sección de la curva generada, por la diferencia de la deformación generada en el mismo intervalo.

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1 (MPa)}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (2.2)$$

Donde σ_2 y σ_1 son los esfuerzos en un intervalo en mega pascales, mientras que ε_2 y ε_1 representan las deformaciones unitarias en el mismo intervalo.

2.2.3.4. Ensayo de flexión

Para los ensayos de flexión se aplica la norma ASTM D790-17 y se trabajó con la probeta de flexión obtenida por inyección (Figura 2.17); las dimensiones de la probeta son: 13,50 mm de ancho, 4,20 mm de espesor y 128,00 mm de largo. La norma establece que la probeta a ensayar debe ser colocada sobre los soportes, de manera que sobresalga al menos un 10% de su distancia total a cada lado; se debe seleccionar las probetas que presenten el mejor acabado y estén libres de defectos de tal forma que las imperfecciones no influyan en los resultados finales.



Figura 2.17. Probeta de flexión.
(Fuente: Propia)

Los ensayos de flexión se realizaron en la máquina universal de ensayos de marca INSTRON perteneciente al Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros (CIAP); se instaló los accesorios necesarios que permiten realizar el ensayo y finalmente se procedió a encerrar el equipo ubicando la parte móvil de la máquina lo más cerca posible de la probeta que se encuentra en los soportes tal como se muestra en la Figura 2.18.



Figura 2.18. Encerado previo al ensayo de flexión.
(Fuente: Propia)

Una vez que el equipo fue configurado se procede a iniciar con el ensayo de flexión, siguiendo las directrices especificadas en la norma ASTM-D790-17. En la Figura 2.19 se observa la ejecución del ensayo de flexión.

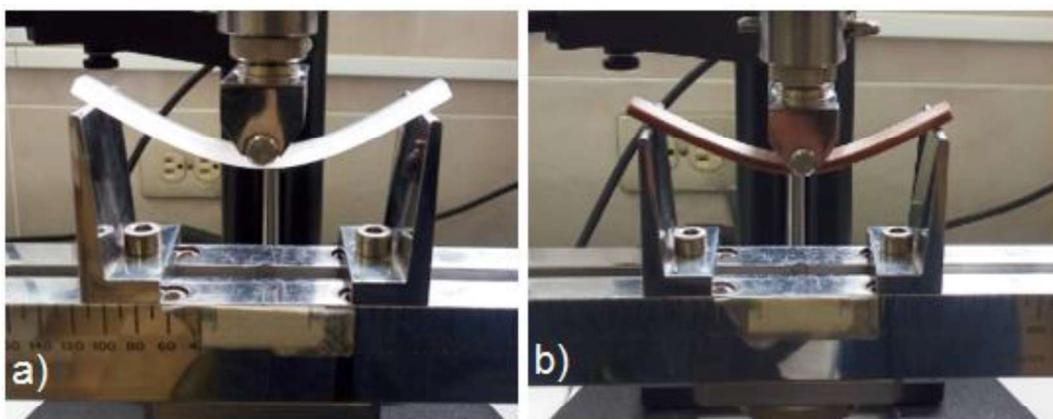


Figura 2.19. Ensayo de flexión a probeta del tipo I, a) Ensayo de flexión espécimen PP100,
b) Ensayo de flexión espécimen PP82-RH15-MAPP.
(Fuente: Propia)

Al igual que para el ensayo de tracción se necesita realizar el ensayo de flexión en al menos 5 probetas para obtener validez. En la Figura 2.20 se observan las probetas de flexión antes y después del ensayo.



Figura 2.20. Probeta de flexión, a) ensayada, b) sin ensayar.
(Fuente: Propia)

Al finalizar el ensayo de flexión, con los datos obtenidos se calcula la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad en flexión. La resistencia a la flexión se calcula de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\sigma [MPa] = \frac{3PL [N \cdot mm]}{2bd^2 [mm^3]} \quad (2.3)$$

En donde P es la fuerza que actúa sobre el material, L la longitud entre apoyos, b es el ancho de la probeta y d es el espesor de dicha probeta.

2.2.3.5. Ensayo de impacto

Para los ensayos de impacto se aplica la norma ASTM D256-10 la cual permite conocer la resistencia al impacto del material justo antes de fracturarse. Se trabajó con la probeta de impacto obtenida por inyección (Figura 2.21); las dimensiones de la probeta son: 63,50 mm de largo, 13,50 mm de ancho y 6,70 mm de espesor.



Figura 2.21. Probeta de impacto.
(Fuente: Propia)

Posteriormente se procede a marcar el punto medio de cada probeta para que pueda ser ensayada, luego se coloca la probeta en la máquina de ensayo de impacto Tinius Olsen IT 504 (Figura 2.22) perteneciente al Laboratorio de Nuevos Materiales (LANUM) y se inicia el ensayo.



Figura 2.22. Ensayo de impacto espécimen PP85-RH15.
(Fuente: Propia)

La norma ASTM D256 establece que para que el ensayo de impacto sea válido se deberá realizar el ensayo en al menos 5 probetas. En la Figura 2.23 se observan las probetas de impacto antes y después del ensayo.



Figura 2.23. Probeta de impacto, a) ensayada, b) sin ensayar.
(Fuente: Propia)

2.2.3.6. Ensayo de dureza

El ensayo de dureza se realiza sobre las probetas de flexión, debido a que estas presentan la superficie más uniforme y plana. Para la ejecución del ensayo se utilizó un durómetro de la marca Bareiss (Figura 2.24) perteneciente al Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros (CIAP), el cual trabaja con la escala Shore D.



Figura 2.24. Durómetro Bareiss escala Shore D.
(Fuente: Propia)

Para los ensayos de dureza se aplica la norma ASTM D2240, en la cual se especifica que el espesor mínimo de los especímenes a ensayar debe ser al menos 6 mm, por lo que fue necesario realizar el ensayo sobre un paquete de dos probetas de flexión apiladas horizontalmente como se observa en la Figura 2.25. La norma ASTM D2240 establece que para que el ensayo de dureza sea válido, se deberá tomar 5 mediciones de dureza con una separación de al menos 6mm entre ellas.



Figura 2.25. Determinación de dureza sobre espécimen PP100.
(Fuente: Propia)

2.2.3.7. Determinación de la densidad

Para determinar la densidad del material se utilizó las probetas de flexión; ya que estas probetas presentan mayor uniformidad y por su geometría es más sencillo determinar su volumen final.

$$V[cm^3] = l(cm) * a(cm) * e(cm) \quad (2.4)$$

En la fórmula 2.4. l representa la longitud, a representa el ancho y e representa el espesor. Posteriormente se debe pesar estas probetas para así obtener el valor de su densidad.

$$\delta = \frac{M[g]}{V[cm^3]} \quad (2.5)$$

2.2.3.8. Análisis termogravimétrico (TGA)

El análisis termogravimétrico determina la variación de la masa de una muestra de material con respecto a la temperatura y el tiempo en el interior de una atmosfera controlada. Para

realizar este análisis se toma una muestra de material de alrededor de 20 mg. Los parámetros que se utiliza en el análisis termogravimétrico (TGA) se definieron tomando en cuenta los estudios realizados por Pilaguano & Vizuela (2017) [24] y Castro & Fajardo (2014) [27]; estos parámetros se muestran en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10. Parámetros establecidos para análisis termogravimétrico (TGA).

Parámetros	Valor	Unidad
Temperatura inicial	Ambiente	°C
Tiempo de permanencia de la temperatura inicial	3	min
Temperatura final	600	°C
Incremento de temperatura	10	°C/min

(Fuente: Propia)

Para el análisis termogravimétrico (TGA) se utilizó el analizador termogravimétrico PYRIS 1 TGA (Figura 2.26) perteneciente al Laboratorio de Caracterización Térmica, de la Facultad de Ingeniería Civil de la Escuela Politécnica Nacional. Utilizando una atmosfera controlada de nitrógeno a un flujo constante de 20.0 ml/min.



Figura 2.26. Analizador termogravimétrico PYRIS 1 TGA.
(Fuente: Propia)

2.2.3.9. Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR)

La espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) es una técnica sensible a la estructura molecular y permite obtener un espectrograma que representa la capacidad de absorción de radiación infrarroja de un material, permitiendo identificar los grupos de átomos en una muestra de material. Generalmente este análisis es utilizado para identificar grupos orgánicos.

Para la obtención de la espectroscopia FTIR se evalúa una cantidad mínima de polipropileno, cascarilla de arroz y biocompuesto; se utilizó el modo de reflexión total atenuado para cada muestra analizada y los resultados obtenidos son expresados en modo de transmitancia en función del número de onda. Para el análisis se utilizó el espectrómetro JASCO FT/IR-6800 (Figura 2.27) perteneciente al Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros (CIAP).



Figura 2.27. Espectrómetro JASCO FT/IR-6800.
(Fuente: Propia)

3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se presenta los resultados obtenidos una vez que se realizaron los ensayos mecánicos, térmicos y determinación de la densidad. Se analizará la influencia del compatibilizante en el biocompuesto y se determinará la variación en las propiedades del compuesto con respecto a las propiedades de la matriz de polipropileno; por ello se dividirá los resultados en composiciones de biocompuesto con compatibilizante (MAPP) y sin este. Finalmente se realiza una comparación con estudios similares.

3.1. Resultados obtenidos

Son valores obtenidos correspondientes a cada ensayo mecánico, térmico y de determinación de densidad aplicados sobre cada probeta o muestra de matriz, refuerzo y/o biocompuesto, los cuales permiten determinar la variación de las propiedades del biocompuesto con respecto a la matriz y el refuerzo.

3.1.1. Refuerzo

Se trata de la cascarilla de arroz utilizada como refuerzo, siendo caracterizada térmicamente y conociendo así su comportamiento al aumentar la temperatura.

3.1.1.1. Caracterización térmica

La caracterización térmica del refuerzo se realiza mediante la aplicación de un análisis termogravimétrico que permite obtener datos sobre la degradación del material en función de la temperatura.

3.1.1.1.1. Análisis termogravimétrico

Para el análisis termogravimétrico se evalúa una muestra de 20 mg del refuerzo, obteniendo resultados satisfactorios. Las condiciones de trabajo para el análisis termogravimétrico (TGA) fueron expuestas en el apartado 2.2.3.8. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Características del material de refuerzo, sometido a TGA.

Cascarilla de Arroz (RH)	
Temperatura TGA inicial [°C]	20,00
Temperatura TGA final [°C]	600,00
Peso inicial de muestra [mg]	5,51
Peso final de muestra [mg]	2,27
Porcentaje de masa perdido [%]	58,71

(Fuente: Propia)

En la Figura 3.1 se representa la pérdida de masa en función de la temperatura; en donde se observa como la temperatura a medida que aumenta elimina la humedad en el refuerzo, para posteriormente iniciar con la degradación. El refuerzo al ser de naturaleza orgánica tiende a quemarse y convertirse en ceniza; la cual empieza también a degradarse con el aumento de la temperatura, además se observa que el material no se degrada completamente al cumplir las condiciones de trabajo del análisis.

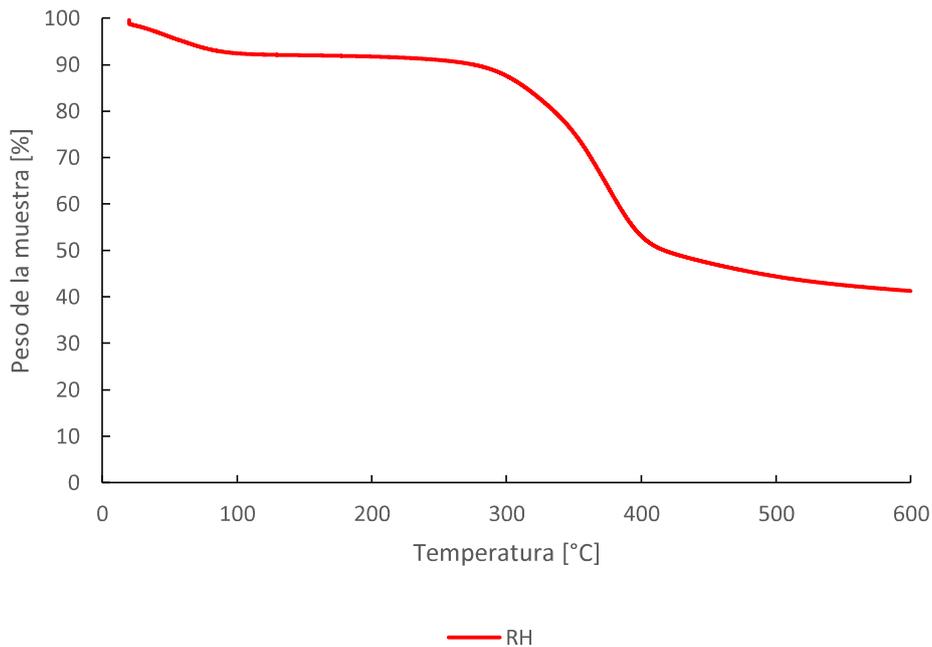


Figura 3.1. Termograma de TGA, correspondiente a la muestra de material de refuerzo RH. (Fuente: Propia)

3.1.2. Matriz

Se trata del polipropileno puro el cual es caracterizado mecánica y térmicamente mediante ensayos y análisis que permiten conocer varias de sus propiedades.

3.1.2.1. Caracterización mecánica

La caracterización mecánica del polipropileno se realiza mediante la aplicación de ensayos de tracción, flexión, impacto IZOD y dureza. Cada ensayo se ejecutó según las normas detalladas en el capítulo 2.

3.1.2.1.1. Ensayo de tracción

Según lo expuesto en la norma ASTM D638 el ensayo de tracción se debe realizar en al menos cinco probetas, por lo cual se realizó el ensayo sobre un mayor número de probetas (Anexo VI); de forma que se pueda descartar probetas mal ensayadas.

En la Tabla 3.2 se presentan los resultados promedio una vez finalizado el ensayo de tracción en las probetas de polipropileno. Entre los valores que se obtiene se encuentra la resistencia a la tracción, la elongación en el último esfuerzo, la resistencia a la tracción en la rotura, elongación máxima y el módulo de elasticidad. Cada valor promedio está acompañado de su respectiva desviación estándar; donde se observa un valor aceptable de desviación, demostrando gran repetitividad en los ensayos realizados, implicando una correcta realización de los mismos.

Tabla 3.2. Características del polipropileno PP, obtenidas después de someter las probetas respectivas al ensayo de tracción y de acuerdo a la ficha técnica.

Composiciones	Resistencia a la tracción		Elongación en el último esfuerzo		Resistencia a la tracción en rotura		Elongación máxima		Módulo de elasticidad	
	[MPa]	S.D.	[%]	S.D.	[Mpa]	S.D.	[%]	S.D.	[Mpa]	S.D.
PP100	32,40	0,60	13,00	0,41	18,30	1,02	413,00	148,73	903,00	37,70
Ficha técnica	34,00	-	12,00	-	-	-	-	-	1500,00	-

(Fuente: Propia, Anexo I)

Con los resultados mostrados en la tabla anterior es posible obtener una gráfica que represente el comportamiento del polipropileno al aplicar un ensayo de tracción. Este comportamiento se muestra en la Figura 3.2.

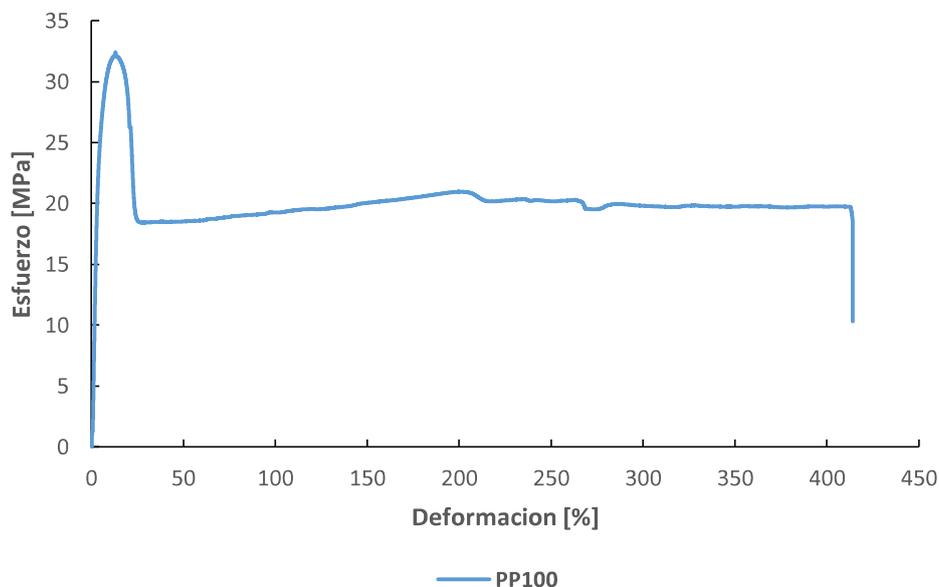


Figura 3.2. Curva Esfuerzo (MPa) vs Deformación (%), correspondiente al ensayo de tracción sobre el polipropileno (PP).
(Fuente: Propia)

En el polipropileno la probeta tiende a deformarse en gran medida antes de efectuarse la fractura. En la Figura 3.3 se observan las probetas de polipropileno antes y después de realizar el ensayo de tracción.



Figura 3.3. Probeta de polipropileno puro sometida a tracción.
(Fuente: Propia)

3.1.2.1.2. Ensayo de flexión

Según lo expuesto en la norma ASTM D790 el ensayo de flexión se debe realizar en al menos cinco probetas, por lo cual se ensayó un mayor número de probetas (Anexo VII), asegurando de esta manera la correcta realización del ensayo.

Entre los resultados obtenidos al realizar el ensayo de flexión se obtuvieron la resistencia a la flexión y la deformación en el esfuerzo máximo. En la Tabla 3.3 se muestran los valores promedio de dichas características acompañados de su respectiva desviación estándar; la cual muestra gran repetitividad en los ensayos realizados.

Tabla 3.3. Características de las composiciones del polipropileno PP, obtenidas después de someter las probetas respectivas al ensayo de flexión.

Composiciones	Resistencia a la flexión		Deformación en el esfuerzo máximo	
	[MPa]	S.D.	[%]	S.D.
PP100	27,40	0,94	4,89	0,11

(Fuente: Propia)

Los valores promedio mostrados en la tabla anterior pueden ser representados en una gráfica que muestra la relación esfuerzo - deformación durante el ensayo de flexión. La Figura 3.4 representa dicho comportamiento.

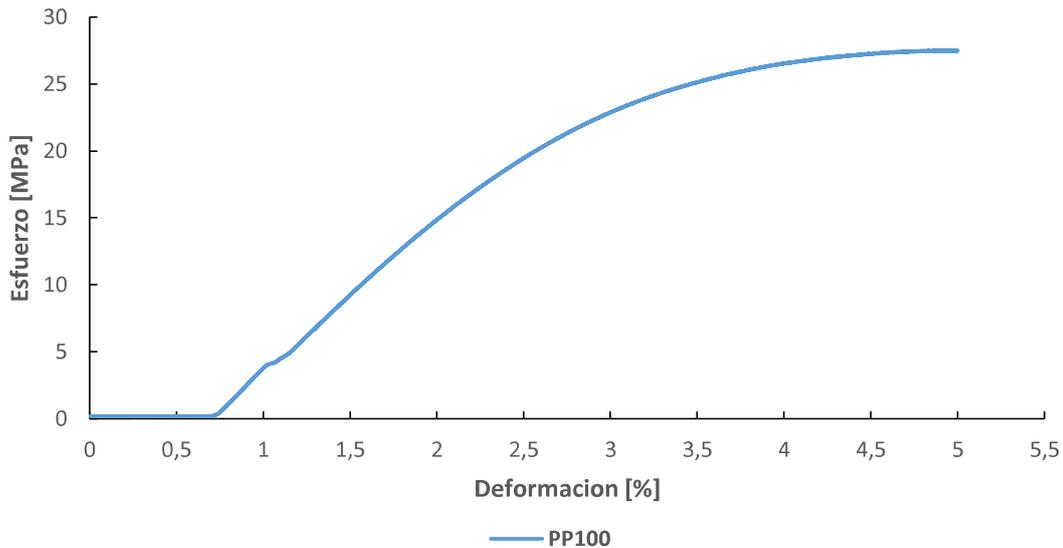


Figura 3.4. Curva Esfuerzo (MPa) vs Deformación (%), correspondiente al ensayo de flexión sobre el polipropileno (PP).
(Fuente: Propia)

3.1.2.1.3. Ensayo de impacto IZOD

Según lo expuesto en la norma ASTM D256 el ensayo de impacto IZOD se debe realizar en al menos cinco probetas y preferiblemente diez, por lo que se realizó el ensayo de impacto sobre 10 probetas (Anexo VIII).

Entre las características obtenidas al realizar el ensayo se encuentra la energía de impacto y la resistencia al impacto. En la Tabla 3.4 se muestran los valores promedio que se obtiene de las probetas ensayadas; así como su respectiva desviación estándar, la cual demuestra repetitividad en los ensayos realizados.

Tabla 3.4. Características del polipropileno PP, obtenidas después de someter las probetas respectivas al ensayo de impacto IZOD.

Composiciones	Energía de impacto		Resistencia al impacto	
	[J]	S.D.	[KJ/m ²]	S.D.
PP100	6,48	1,13	72,18	12,69

(Fuente: Propia)

En todas las probetas de polipropileno puro se produjo una rotura completa. En la Figura 3.5 se observa cada una de las probetas ensayadas.



Figura 3.5. Probetas de PP100 sometidas a ensayo de impacto IZOD.
(Fuente: Propia)

3.1.2.1.4. Ensayo de dureza

Según lo expuesto en la norma ASTM D2240 en el ensayo de dureza se debe tomar al menos cinco mediciones, por lo que para aumentar el éxito del ensayo se realizó 20 mediciones (Anexo IX) sobre las probetas de flexión acopladas para trabajar bajo el requerimiento de la norma. En la Tabla 3.5 se muestran los valores promedio de dureza en escala shore D.

Tabla 3.5. Características del polipropileno PP, obtenidas después de someter las probetas correspondientes a ensayo de dureza.

Composiciones	Dureza	
	Shore D	S.D.
PP100	43,95	1,05

(Fuente: Propia)

En la tabla anterior se observa una desviación estándar baja, lo que demuestra gran repetitividad en los resultados de los ensayos realizados.

3.1.2.2. Caracterización térmica

La caracterización térmica de la matriz se realizó mediante la aplicación de un análisis termogravimétrico (TGA), permitiendo conocer la degradación del material con respecto al avance del tiempo y la temperatura.

3.1.2.2.1. Análisis termogravimétrico

Para el análisis termogravimétrico (TGA) se utilizó los parámetros expuestos en la sección 2.2.3.8; para lo cual se analizó 20 mg de polipropileno por alrededor de una hora. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Características de la muestra de polipropileno, PP100, sometida a TGA.

PP100	
Temperatura TGA inicial [°C]	20,00
Temperatura TGA final [°C]	600,00
Peso inicial de muestra [g]	3,65
Peso final de muestra [g]	0,00
Porcentaje de masa perdido [%]	100,00

(Fuente: Propia)

En lo que respecta a la pérdida de masa en función de la temperatura se logró obtener una curva característica que se muestra en la Figura 3.6; en la que se observa como ocurre la degradación del material mientras aumenta la temperatura y notándose que una vez alcanzada la temperatura final el material se degrada completamente.

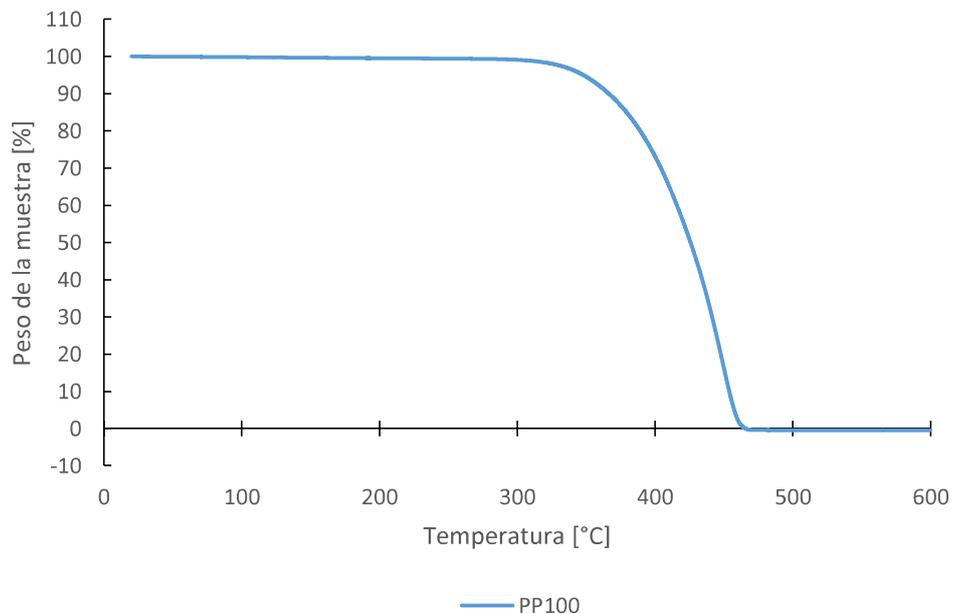


Figura 3.6. Termograma de TGA, correspondiente a la muestra de Polipropileno PP100. (Fuente: Propia)

3.1.2.3. Determinación de la densidad

Para la determinación de la densidad se consideró las condiciones expuestas en el apartado 2.2.3.7; por lo que se procedió a pesar y medir siete probetas de flexión de polipropileno y mediante la aplicación de las fórmulas correspondientes obtener un valor de volumen que posteriormente en conjunto con el peso medido permiten obtener el valor promedio de la densidad junto a su respectiva desviación estándar (Anexo X). Los valores se detallan en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Densidad de la muestra de polipropileno, PP100.

Composiciones	Volumen	Masa		Densidad	
	[cm^3]	[g]	S.D.	[g/cm^3]	S.D.
PP100	7,26	6,15	0,05	0,85	0,01

(Fuente: Propia)

3.1.3. Biocompuestos con MAPP

Se trata de los compuestos que contienen compatibilizante (MAPP) en su composición que son caracterizados mecánica y térmicamente mediante ensayos y análisis correspondientes los cuales permiten conocer varias de sus propiedades.

3.1.3.1. Caracterización mecánica

La caracterización mecánica para las composiciones de biocompuesto con compatibilizante (MAPP) se realiza mediante la aplicación de los ensayos de tracción, flexión, impacto IZOD y dureza. Cada ensayo se ejecutó según las normas detalladas en el capítulo 2.

3.1.3.1.1. Ensayo de tracción

Según lo expuesto en la norma ASTM D638 el ensayo de tracción se debe realizar en al menos cinco probetas; por lo cual se realizó el ensayo sobre un mayor número de probetas (Anexo VI), de forma que se pueda descartar alguna probeta mal ensayada

Los resultados que se obtienen al finalizar el ensayo de tracción se presentan en la Tabla 3.8 en donde se muestran los valores promedio obtenidos con su respectiva desviación estándar. Entre las características que se obtienen se observa la resistencia a la tracción, la elongación en el último esfuerzo, la resistencia a la tracción en la rotura, elongación máxima y el módulo de elasticidad.

Tabla 3.8. Características del biocompuesto con MAPP, obtenidas después de someter las probetas respectivas al ensayo de tracción.

Composiciones	Resistencia a la tracción		Elongación en el último esfuerzo		Resistencia a la tracción en rotura		Elongación máxima		Módulo de elasticidad	
	[MPa]	S.D.	[%]	S.D.	[MPa]	S.D.	[%]	S.D.	[MPa]	S.D.
PP92-RH5-MAPP	33,10	0,51	11,10	0,24	30,91	0,72	16,62	1,21	993,00	30,00
PP82-RH15-MAPP	32,31	0,48	7,90	0,40	31,50	0,49	9,61	0,64	1057,00	75,30
PP72-RH25-MAPP	31,12	0,59	5,69	0,16	30,62	0,67	6,31	0,49	1250,00	90,71

(Fuente: Propia)

En la mayoría de las composiciones la desviación estándar es baja, determinando así la correcta realización del ensayo; además con los datos obtenidos es posible representar el comportamiento de cada composición con compatibilizante (MAPP) frente al ensayo de tracción. En la Figura 3.7 se representa este comportamiento.

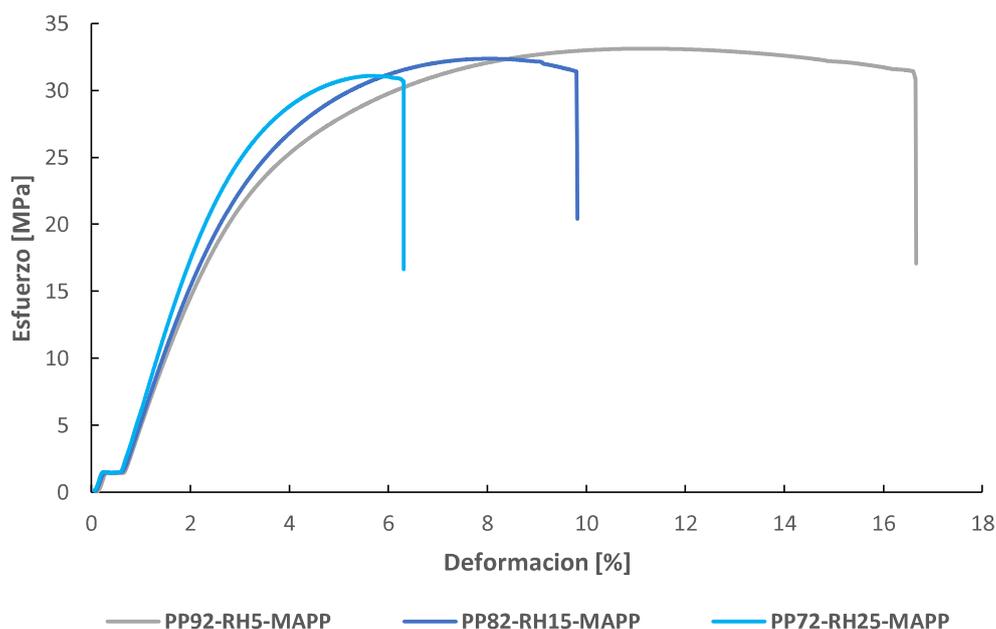


Figura 3.7. Curva Esfuerzo (MPa) vs Deformación (%), correspondiente al ensayo de tracción sobre biocompuestos con MAPP.

(Fuente: Propia)

La elongación producida antes de la fractura en las composiciones de biocompuesto con compatibilizante (MAPP) fue mínima en comparación con la producida en el polipropileno. En la Figura 3.8 se muestran las probetas antes y después de realizar el ensayo de tracción para una composición de biocompuesto con compatibilizante (MAPP).



Figura 3.8. Probetas de biocompuesto con MAPP sometida a tracción a) probeta ensayada, b) probeta sin ensayar.
(Fuente: Propia)

3.1.3.1.2. Ensayo de flexión

Según lo expuesto en la norma ASTM D790 el ensayo de flexión se debe realizar en al menos cinco probetas, por lo que se ensayó un mayor número de probetas (Anexo VII) asegurando de esta manera que se pueda minimizar el riesgo de error y obtener resultados mas confiables.

Una vez finalizado el ensayo de flexion se pudo determinar la resistencia a la flexión y la deformación en el esfuerzo máximo. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.9; estos representan el valor promedio de cada característica y vienen acompañados de su respectiva desviación estándar.

Tabla 3.9. Características de las composiciones de biocompuesto con MAPP, obtenidas después de someter las probetas respectivas al ensayo de flexión.

Composiciones	Resistencia a la flexión		Deformación en el esfuerzo máximo	
	[MPa]	S.D.	[%]	S.D.
PP92-RH5-MAPP	30,81	0,75	4,97	0,05
PP82-RH15-MAPP	34,01	0,93	4,81	0,31
PP72-RH25-MAPP	39,70	0,92	4,80	0,12

(Fuente: Propia)

Los valores promedio mostrados en la tabla anterior presentan una desviación estándar baja, lo que implica una correcta realización del ensayo; estos valores pueden ser representados en una gráfica que demuestre cómo se comporta cada composición de biocompuesto con compatibilizante (MAPP) durante el ensayo de flexión. La Figura 3.9 representa dicho comportamiento.

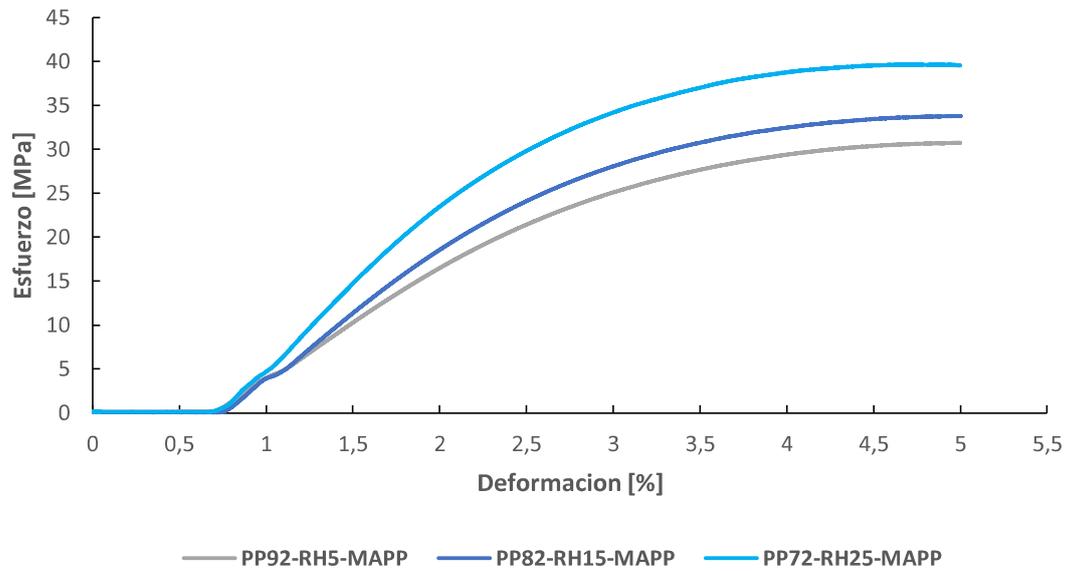


Figura 3.9. Curva Esfuerzo (MPa) vs Deformación (%), correspondiente al ensayo de flexión sobre biocompuestos con MAPP.
(Fuente: Propia)

En la Figura 3.10 se muestran un ejemplar de cada composición de biocompuesto con compatibilizante (MAPP) que fue sometido a flexión. En cada probeta físicamente la flexión es mínima, llegando a ser poco notoria.



Figura 3.10. Probetas de biocompuesto de distintas composiciones después de ser sometidas a ensayo de flexión. De arriba hacia abajo respectivamente las muestras PP100, PP92-RH5-MAPP, PP82-RH15-MAPP, PP72-RH25-MAPP.
(Fuente: Propia)

3.1.3.1.3. Ensayo de impacto IZOD

Según lo expuesto en la norma ASTM D256 el ensayo de impacto IZOD se debe realizar en al menos cinco probetas y preferiblemente diez, por lo que se realizó el ensayo de impacto sobre 10 probetas de biocompuesto con compatibilizante (MAPP) (Anexo VIII).

Los resultados obtenidos una vez realizado el ensayo son la energía de impacto y la resistencia al impacto. En la Tabla 3.10 se muestra el valor promedio de cada característica obtenida una vez finalizados los ensayos. Cada valor está acompañado de su respectiva desviación estándar.

Tabla 3.10. Características del biocompuesto con MAPP, obtenidas después de someter las respectivas probetas al ensayo de impacto IZOD.

Composiciones	Energía de impacto		Resistencia al impacto	
	[J]	S.D.	[KJ/m ²]	S.D.
PP92-RH5-MAPP	1,47	0,17	16,41	1,91
PP82-RH15-MAPP	1,30	0,19	14,48	2,14
PP72-RH25-MAPP	0,98	0,13	10,93	1,45

(Fuente: Propia)

Se observa la baja desviación estándar en cada característica obtenida, determinando de esta manera la correcta realización del ensayo de impacto IZOD para las composiciones con compatibilizante (MAPP).

En la Figura 3.11 se muestran las probetas de biocompuesto con compatibilizante (MAPP) una vez realizado el ensayo de impacto, en donde se verifica una fractura completa de las mismas.



Figura 3.11. Probetas de biocompuesto con MAPP, sometidas a ensayo de impacto IZOD.
(Fuente: Propia)

3.1.3.1.4. Ensayo de dureza

Según lo expuesto en la norma ASTM D2240, en el ensayo de dureza se debe tomar al menos cinco mediciones, por lo que para aumentar el éxito del ensayo se realizó 20 mediciones (Anexo IX) sobre las probetas de flexión acopladas para trabajar bajo el requerimiento de la norma.

En la Tabla 3.11 se muestran los valores promedio de dureza en escala shore D de cada composición de biocompuesto con compatibilizante (MAPP). Cada valor posee su respectiva desviación estándar para demostrar la validez y repetitividad de los ensayos de dureza realizados. En este caso la desviación estándar es baja, demostrando la correcta realización del ensayo de dureza.

Tabla 3.11. Características del biocompuesto con MAPP, obtenidas después de someter las probetas correspondientes a ensayo de dureza.

Composiciones	Dureza	
	Shore D	S.D.
PP92-RH5-MAPP	53,70	1,66
PP82-RH15-MAPP	56,30	1,47
PP72-RH25-MAPP	59,20	1,40

(Fuente: Propia)

3.1.3.2. Caracterización térmica

La caracterización térmica de las composiciones de biocompuesto con compatibilizante (MAPP) se realizó mediante la aplicación de un análisis termogravimétrico (TGA), permitiendo conocer la degradación del material en función del tiempo y la temperatura.

3.1.3.2.1. Análisis termogravimétrico

Para el análisis termogravimétrico (TGA) de las muestras correspondientes al biocompuesto con compatibilizante (MAPP), se procedió a seguir las condiciones de trabajo expuestas en el apartado 2.2.3.8; se analiza 20 mg de material de cada composición del biocompuesto con compatibilizante (MAPP) y los resultados se muestran en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12. Características de las muestras de biocompuesto con MAPP, sometidas a TGA.

	PP92-RH5-MAPP	PP82-RH15-MAPP	PP72-RH25-MAPP
Temperatura TGA inicial [°C]	20,00		
Temperatura TGA final [°C]	600,00		
Peso inicial de muestra [mg]	15,46	11,14	11,29
Peso final de muestra [mg]	0,33	0,82	1,49
Porcentaje de masa perdido [%]	97,89	92,68	86,84

(Fuente: Propia)

El equipo que se utilizó permitió obtener una curva que representa la pérdida de masa en función del aumento de temperatura. Esta curva se muestra en la Figura 3.12 y representa la degradación ocurrida en cada composición de biocompuesto con compatibilizante (MAPP).

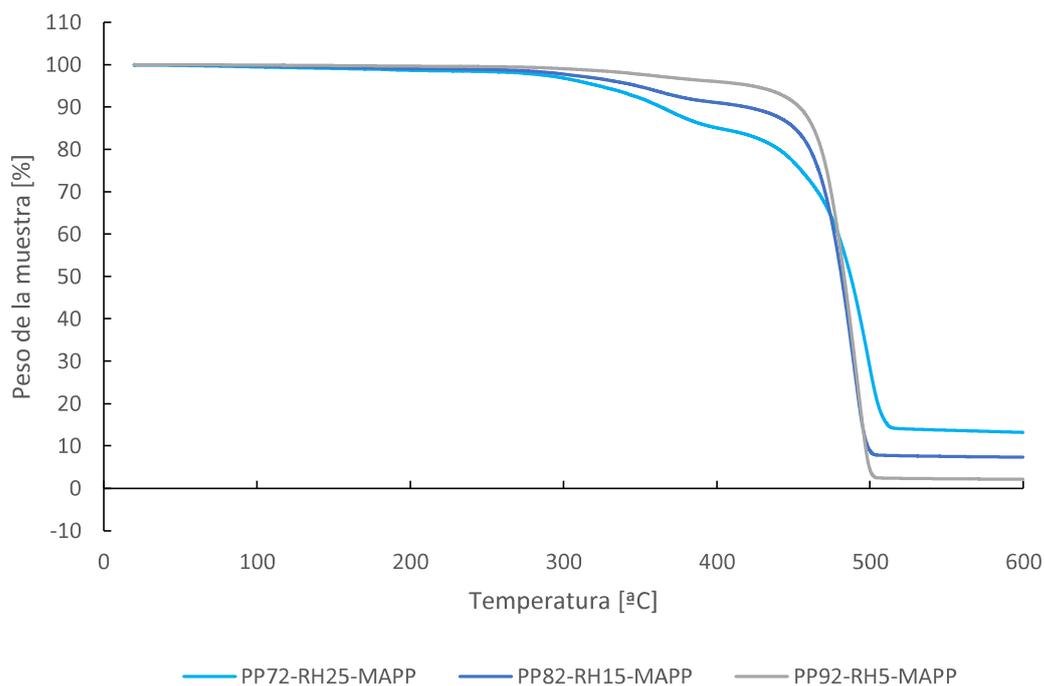


Figura 3.12. Termograma de TGA, correspondiente a la muestra de polipropileno PP100. (Fuente: Propia)

3.1.3.3. Determinación de la densidad

Para la determinación de la densidad se consideró las condiciones expuestas en el apartado 2.2.3.7; por lo que se procedió a pesar y medir siete probetas de flexión de cada composición de biocompuesto con compatibilizante (MAPP) y mediante la aplicación de las fórmulas correspondientes obtener un valor de volumen que posteriormente en conjunto con el peso medido permiten obtener el valor promedio de la densidad junto a su respectiva desviación estándar (Anexo X). Los valores se detallan en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13. Densidad de las muestras de biocompuesto con MAPP.

Composiciones	Volumen	Masa		Densidad	
	[cm^3]	[g]	S.D.	[g/cm^3]	S.D.
PP92-RH5-MAPP	7,26	6,46	0,05	0,89	0,01
PP82-RH15-MAPP	7,26	6,61	0,04	0,91	0,01
PP72-RH25-MAPP	7,26	6,96	0,07	0,96	0,01

(Fuente: Propia)

3.1.4. Biocompuestos sin MAPP

Se trata de los compuestos sin compatibilizante (MAPP) en su composición que son caracterizados mecánica y térmicamente mediante ensayos y análisis correspondientes los cuales permiten conocer varias de sus propiedades.

3.1.4.1. Caracterización mecánica

La caracterización mecánica para las composiciones de biocompuesto sin compatibilizante (MAPP) se realiza mediante la aplicación de los ensayos de tracción, flexión, impacto IZOD y dureza. Cada ensayo se ejecutó según las normas detalladas en el capítulo 2.

3.1.4.1.1. Ensayo de tracción

Según lo expuesto en la norma ASTM D638 el ensayo de tracción se debe realizar en al menos cinco probetas, por lo cual se realizó el ensayo sobre un mayor número de probetas (Anexo VI) de forma que se pueda descartar alguna probeta mal ensayada y se asegure el éxito del ensayo.

Los resultados que se obtienen al finalizar el ensayo de tracción se presentan en la Tabla 3.14 en donde se muestran los valores promedio obtenidos con su respectiva desviación estándar. Entre las características que se obtienen se observa la resistencia a la tracción, la elongación en el último esfuerzo, la resistencia a la tracción en la rotura, elongación máxima y el módulo de elasticidad.

Tabla 3.14. Características del biocompuesto sin MAPP, obtenidas después de someter las probetas respectivas al ensayo de tracción.

Composiciones	Resistencia a la tracción		Elongación en el último esfuerzo		Resistencia a la tracción en rotura		Elongación máxima		Módulo de elasticidad	
	[MPa]	S.D.	[%]	S.D.	[MPa]	S.D.	[%]	S.D.	[MPa]	S.D.
PP95-RH5	30,81	0,39	10,50	0,14	28,81	0,41	15,80	1,20	971,00	19,10
PP85-RH15	29,10	0,42	8,41	0,34	27,50	0,52	11,81	1,45	1030,00	70,92
PP75-RH25	28,72	0,43	6,46	0,37	27,72	0,52	7,93	0,66	1174,00	79,61

(Fuente: Propia)

En la tabla anterior se observa que la desviación estándar es baja en los valores obtenidos de las composiciones ensayadas, lo que demuestra la correcta realización del ensayo; además, es posible representar el comportamiento de cada composición sin compatibilizante (MAPP) frente al ensayo de tracción. La Figura 3.13 muestra este comportamiento.

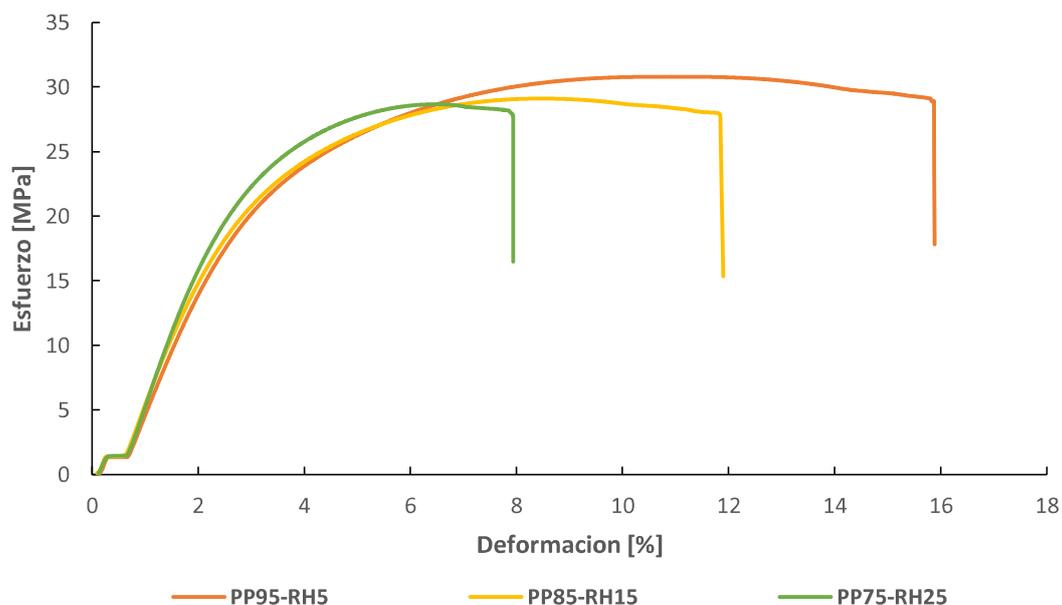


Figura 3.13. Curva Esfuerzo (MPa) vs Deformación (%), correspondiente al ensayo de tracción sobre biocompuestos sin MAPP.

(Fuente: Propia)

En las composiciones del biocompuesto sin compatibilizante (MAPP), la fractura se produjo con una elongación mínima en relación con la producida por el polipropileno. En la Figura 3.14 se muestran las probetas antes y después de realizar el ensayo de tracción para una composición de biocompuesto sin compatibilizante (MAPP).



Figura 3.14. Probetas de biocompuesto sin MAPP sometida a tracción a) probeta ensayada, b) probeta sin ensayar.
(Fuente: Propia)

3.1.4.1.2. Ensayo de flexión

Según lo expuesto en la norma ASTM D790 el ensayo de flexión se debe realizar en al menos cinco probetas, por lo que se ensayó un mayor número de probetas (Anexo VII) asegurando de esta manera que se pueda minimizar el riesgo de error y obtener resultados mas precisos.

Entre las características obtenidas al concluir el ensayo de flexión se encuentra la resistencia a la flexión y la deformación en el esfuerzo máximo de flexión. Estos valores se muestran en la Tabla 3.15 y representan el valor promedio de cada característica obtenida acompañado de su respectiva desviación estándar.

Tabla 3.15. Características de las composiciones de biocompuesto sin MAPP, obtenidas después de someter las probetas respectivas al ensayo de flexión.

Composiciones	Resistencia a la flexión		Deformación en el esfuerzo máximo	
	[MPa]	S.D.	[%]	S.D.
PP95-RH5	28,71	0,43	4,94	0,05
PP85-RH15	30,79	0,27	4,93	0,08
PP75-RH25	33,20	0,49	4,82	0,10

(Fuente: Propia)

Los valores promedio mostrados en la tabla anterior muestran una desviación estándar baja, demostrando una correcta realización del ensayo; además estos valores pueden ser representados en una gráfica que muestre cómo se comporta cada composición de biocompuesto sin compatibilizante (MAPP) durante el ensayo de flexión. La Figura 3.15 representa dicho comportamiento.

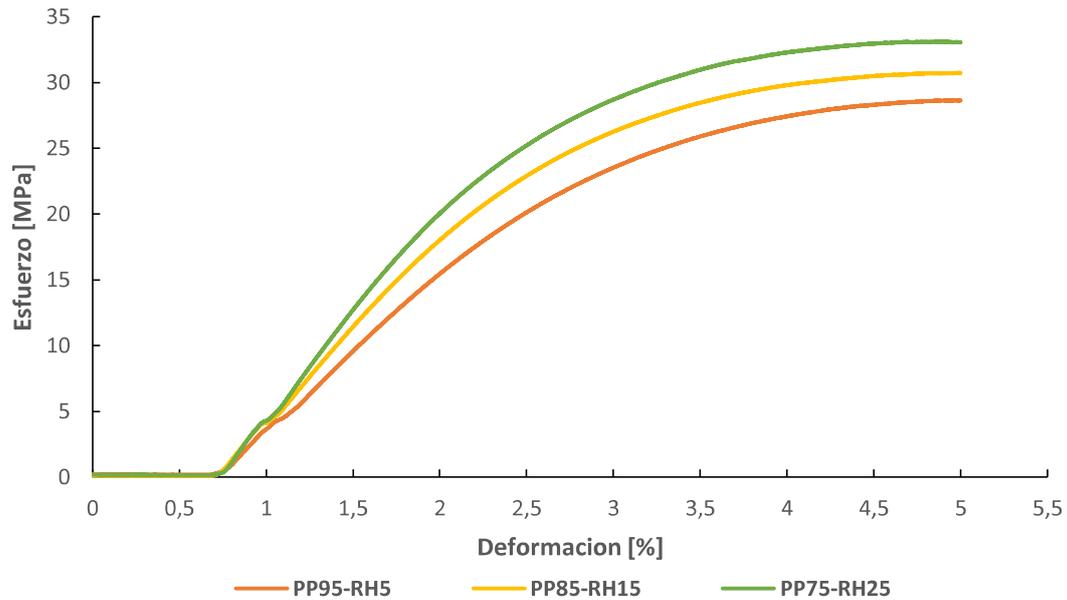


Figura 3.15. Curva Esfuerzo (MPa) vs Deformación (%), correspondiente al ensayo de flexión sobre biocompuestos sin MAPP.
(Fuente: Propia)

En la Figura 3.16 se muestran las probetas ensayadas a flexión, correspondientes a las composiciones de biocompuesto sin compatibilizante (MAPP). En cada probeta físicamente la flexión es mínima, llegando a ser poco notoria.



Figura 3.16. Probetas de biocompuesto de distintas composiciones después de ser sometidas a ensayo de flexión. De arriba hacia abajo respectivamente las muestras PP100, PP95-RH5, PP85-RH15, PP75-RH25.
(Fuente: Propia)

3.1.4.1.3. Ensayo de impacto IZOD

Según lo expuesto en la norma ASTM D256 el ensayo de impacto IZOD se debe realizar en al menos cinco probetas y preferiblemente diez, por lo que se realizó el ensayo de impacto sobre 10 probetas de biocompuesto sin compatibilizante (MAPP) (Anexo VIII).

Las propiedades que se obtiene al realizar el ensayo de impacto IZOD son la energía de impacto y la resistencia al impacto. En la Tabla 3.16 se muestra el valor promedio de cada característica obtenida una vez finalizados los ensayos. Cada valor está acompañado de su respectiva desviación estándar.

Tabla 3.16. Características del biocompuesto sin MAPP, obtenidas después de someter las respectivas probetas al ensayo de impacto IZOD.

Composiciones	Energía de impacto		Resistencia al impacto	
	[J]	S.D.	[KJ/m ²]	S.D.
PP95-RH5	1,64	0,23	18,26	2,52
PP85-RH15	1,31	0,22	14,70	2,40
PP75-RH25	1,05	0,13	11,78	1,43

(Fuente: Propia)

En la tabla anterior se observa que la desviación estándar es baja en cada resultado obtenido; por lo que se puede determinar la correcta realización del ensayo.

La Figura 3.17 se muestra las probetas de biocompuesto sin compatibilizante (MAPP) ensayadas, donde se observa una fractura completa de las mismas.



Figura 3.17. Probetas de biocompuesto sin MAPP sometidas a ensayo de impacto IZOD.
(Fuente: Propia)

3.1.4.1.4. Ensayo de dureza

Según lo expuesto en la norma ASTM D2240, en el ensayo de dureza se debe tomar al menos cinco mediciones, por lo que para aumentar el éxito del ensayo se realizó 20 mediciones (Anexo IX) sobre las probetas de flexión acopladas para trabajar bajo el requerimiento de la norma.

En la Tabla 3.17 se muestran los valores promedio de dureza en escala shore D de cada composición de biocompuesto sin compatibilizante (MAPP). En este caso la desviación estándar que acompaña a cada valor de dureza es bajo demostrando repetitividad y una correcta realización del ensayo de dureza.

Tabla 3.17. Características del biocompuesto sin MAPP, obtenidas después de someter las probetas correspondientes a ensayo de dureza.

Composiciones	Dureza	
	Shore D	S.D.
PP95-RH5	52,65	1,63
PP85-RH15	55,30	1,13
PP75-RH25	58,05	1,23

(Fuente: Propia)

3.1.4.2. Caracterización térmica

La caracterización térmica de las composiciones de biocompuesto sin compatibilizante (MAPP) se realizó mediante la aplicación de un análisis termogravimétrico (TGA); permitiendo conocer la degradación del material con respecto al avance del tiempo y la temperatura.

3.1.4.2.1. Análisis termogravimétrico

Para el análisis termogravimétrico (TGA) de las muestras correspondientes al biocompuesto sin compatibilizante (MAPP) se procedió a trabajar con las condiciones expuestas en el apartado 2.2.3.8; se analiza 20 mg de material de cada composición de biocompuesto sin compatibilizante (MAPP). Finalmente, los resultados se detallan en la Tabla 3.18.

Tabla 3.18. Características de las muestras de biocompuesto sin MAPP, sometidas a TGA.

	PP95-RH5	PP85-RH15	PP75-RH25
Temperatura TGA inicial [°C]	20,00		
Temperatura TGA final [°C]	600,00		
Peso inicial de muestra [mg]	13,27	11,03	10,89
Peso final de muestra [mg]	0,43	0,67	1,19
Porcentaje de masa perdido [%]	96,79	93,96	89,04

(Fuente: Propia)

El equipo utilizado permitió obtener una curva que representa la pérdida de masa en función del aumento de temperatura. Esta curva se muestra en la Figura 3.18 y representa la degradación ocurrida en cada composición de biocompuesto sin compatibilizante (MAPP).

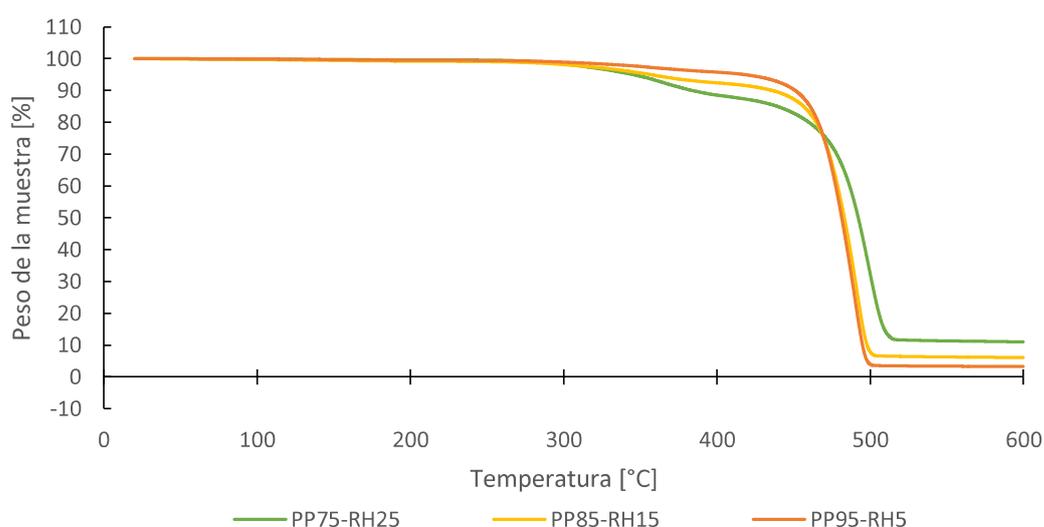


Figura 3.18. Termograma de TGA, correspondiente a la muestra de polipropileno PP100. (Fuente: Propia)

3.1.4.3. Determinación de la densidad

Para la determinación de la densidad se consideró las condiciones expuestas en el apartado 2.2.3.7; por lo que se procedió a pesar y medir siete probetas de flexión de cada composición de biocompuesto sin compatibilizante (MAPP) y mediante la aplicación de las fórmulas correspondientes obtener un valor de volumen que posteriormente en conjunto con el peso medido permiten obtener el valor promedio de la densidad junto a su respectiva desviación estándar (Anexo X). Los valores se detallan en la Tabla 3.19.

Tabla 3.19. Densidad de las muestras de biocompuesto con MAPP.

Composiciones	Volumen	Masa		Densidad	
	[cm^3]	[g]	S.D.	[g/cm^3]	S.D.
PP95-RH5	7,26	6,32	0,05	0,87	0,01
PP85-RH15	7,26	6,47	0,04	0,89	0,01
PP75-RH25	7,26	6,70	0,03	0,92	0,00

(Fuente: Propia)

3.1.5. Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR)

Para realizar la espectroscopia FTIR se utiliza 50 mg de cada material, ninguna muestra fue sometida a un secado previo. Para analizar el biocompuesto se utilizó una muestra de la composición PP85-RH15 y así verificar el impacto que tiene la cascarilla de arroz en el polipropileno; se omite una composición que contenga compatibilizante (MAPP) debido al bajo porcentaje utilizado y al no tener un efecto evidente en el espectrograma del polipropileno tal como M. Seydibeyoğlu et al. [28] demostró en su investigación. Al finalizar la espectroscopia FTIR se obtuvo espectrogramas que representan al polipropileno (Figura 3.19), la cascarilla de arroz (Figura 3.20) y el biocompuesto (Figura 3.21).

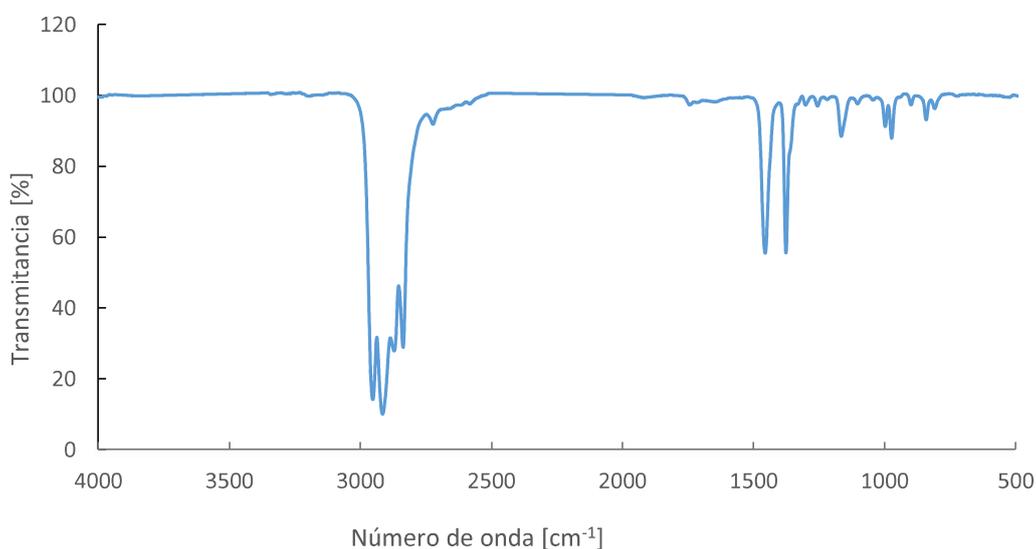


Figura 3.19. Espectrograma, correspondiente al polipropileno.
(Fuente: Propia)

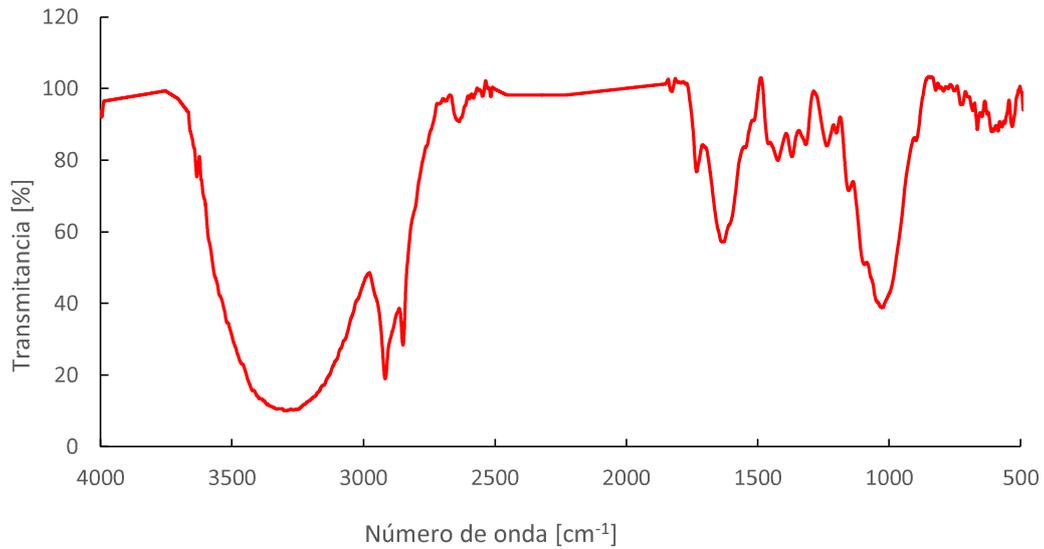


Figura 3.20. Espectrograma, correspondiente a la cascarilla de arroz.
(Fuente: Propia)

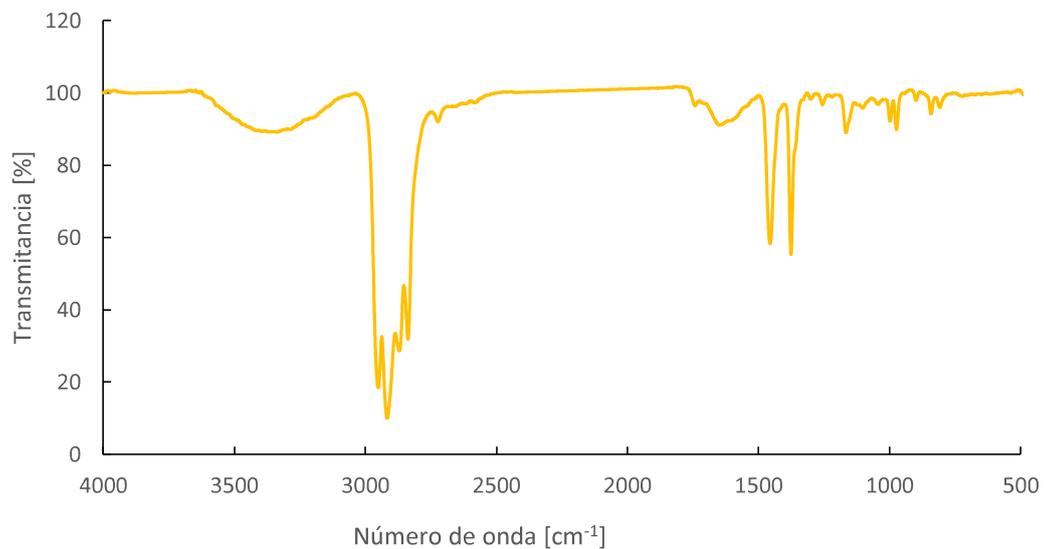


Figura 3.21. Espectrograma, correspondiente al biocompuesto.
(Fuente: Propia)

3.2. Análisis de resultados obtenidos

Al obtener los resultados de las características de cada composición de biocompuesto ensayada, es posible realizar una comparación en la que se evidencie la influencia del porcentaje de refuerzo y compatibilizante (MAPP) en la matriz.

3.2.1. Ensayo de tracción

En la Tabla 3.20 se muestran los resultados obtenidos de todas las probetas ensayadas a tracción, incluyendo el polipropileno y los biocompuestos que contienen y no contienen compatibilizante (MAPP).

Tabla 3.20. Características del polipropileno y el biocompuesto, obtenidos después de ser sometidos a tracción.

Composiciones	Resistencia a la tracción	Elongación en el último esfuerzo	Resistencia a la tracción en rotura	Elongación máxima	Módulo de elasticidad
	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]	[MPa]
PP100	32,40	13,00	18,30	413,00	903,00
PP95-RH5	30,81	10,50	28,81	15,80	971,00
PP92-RH5-MAPP	33,10	11,10	30,91	16,62	993,00
PP85-RH15	29,10	8,41	27,50	11,81	1030,00
PP82-RH15-MAPP	32,31	7,90	31,50	9,61	1057,00
PP75-RH25	28,72	6,46	27,72	7,93	1174,00
PP72-RH25-MAPP	31,12	5,69	30,62	6,31	1250,00

(Fuente: Propia)

Cada característica obtenida es comparada tomando en cuenta la adición de compatibilizante (MAPP) y el porcentaje de cascarilla de arroz en la matriz; cada comparación se realiza por medio de gráficos de barras y fotografías correspondientes de cada material ensayado. En la Figura 3.22 se muestra los valores de resistencia a la tracción en un gráfico de barras, en donde se observa cómo varían los valores obtenidos en cada composición analizada.

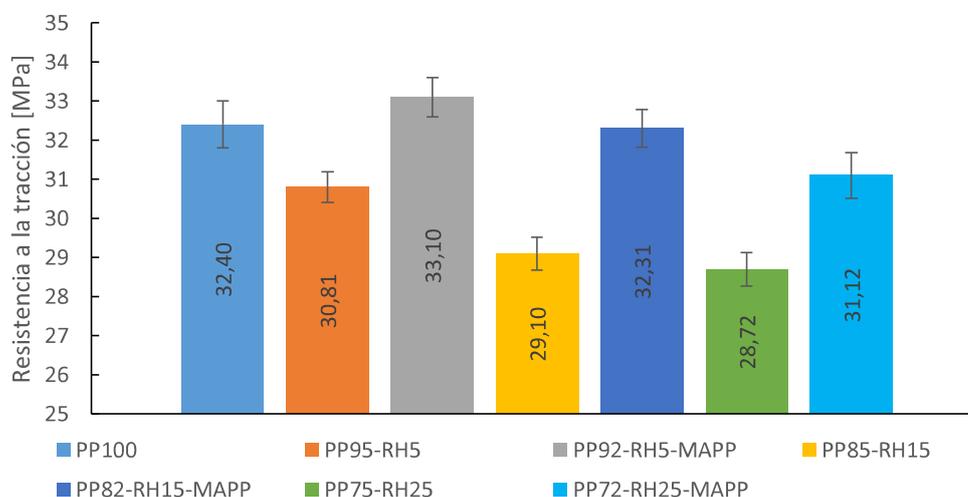


Figura 3.22. Resistencia a la tracción obtenida en el biocompuesto.
(Fuente: Propia)

En la figura anterior se observa que la resistencia a la tracción disminuye a medida que aumenta el porcentaje de refuerzo en la matriz, también se nota que existe influencia positiva del compatibilizante (MAPP) sobre la resistencia a la tracción en composiciones de biocompuesto con similar porcentaje de refuerzo; sin embargo, este aumento de resistencia a la tracción a su vez disminuye la ductilidad del biocompuesto. Estas características son

comunes en los biocompuestos, debido a la baja interacción entre el polipropileno de naturaleza hidrófoba y el refuerzo de naturaleza hidrofílica, por lo que la inclusión del refuerzo genera discontinuidad a lo largo de la matriz, favoreciendo las concentraciones de tensiones a lo largo de la probeta y disminuyendo la resistencia mecánica del material; por tanto, aumentando su fragilidad. Este comportamiento también se observa en la investigación realizada por H. Yang et al (2004) [22].

La adición de compatibilizante (MAPP) sobre el biocompuesto logra mejorar la resistencia a la tracción en alrededor del 7%, 10% y 8% para las composiciones de 5%, 15% y 25% de refuerzo respectivamente. La composición PP92-RH5-MAPP presenta la mayor resistencia a la tracción en los biocompuestos desarrollados, incrementando la magnitud de esta propiedad en aproximadamente 2% con respecto a los valores registrados por el polipropileno. Por otro lado, se observa mayor disminución en la magnitud de esta propiedad sobre la composición PP75-RH25, en donde la resistencia a la tracción disminuye en alrededor del 11% con respecto al polipropileno.

A medida que el ensayo de tracción se ejecuta las probetas tienden a deformarse antes de fracturarse, este comportamiento se representa mediante porcentaje de deformación con respecto a las dimensiones iniciales de la probeta de tracción. En la Figura 3.23 se observa el porcentaje de deformación de cada composición ensayada, en donde es posible notar que a medida que aumenta la cantidad de refuerzo la deformación sobre las probetas ensayadas es menor; este comportamiento se da como consecuencia de la disminución de la ductilidad del material.

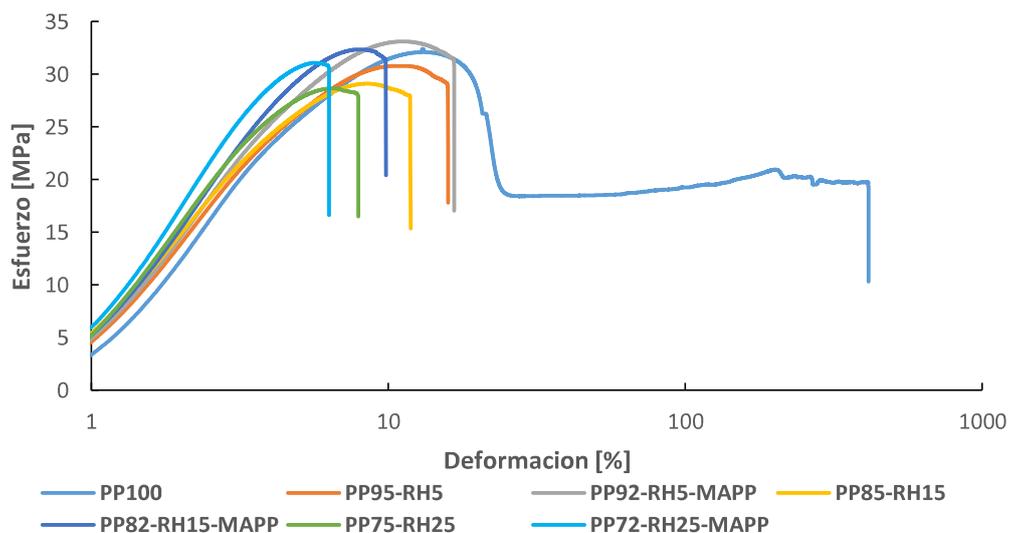


Figura 3.23. Elongación máxima luego de realizar el ensayo de tracción en todas las composiciones.
(Fuente: Propia)

En la figura anterior se puede notar como varia la fluidez del material a medida que aumenta la cantidad de refuerzo o se incluye compatibilizante en la estructura del material. Se puede observar que en las composiciones de biocompuesto desarrolladas, la composición PP92-RH5-MAPP es la que presenta mayor fluidez, soportando mayor porcentaje de deformación antes de fracturarse en relación al resto de composiciones; por el contrario, la composición PP72-RH25-MAPP es la que se deforma en menor medida antes de la fractura; sin embargo, ninguna composición mantiene la ductilidad del polipropileno ni tampoco logran una gran deformación antes de fracturarse, ya que la inclusión de refuerzo disminuye la fluidez del material. Esta disminución de fluidez se debe a la aglomeración irregular de las partículas de refuerzo sobre la matriz; esto a su vez produce una transferencia incorrecta de los esfuerzos aplicados, logrando una fractura más breve.

El compatibilizante (MAPP) otorga menor fluidez en composiciones con similar porcentaje de refuerzo, debido a que mejora la nucleación alrededor de las partículas de refuerzo, permitiendo una consolidación del biocompuesto mucho más eficiente, derivando en una estructura más compacta con menor fluidez que se fractura más pronto en relación a composiciones con similar porcentaje de refuerzo y sin compatibilizante (MAPP). Este comportamiento también fue observado en el estudio realizado por Castro & Fajardo (2014) [27].

Una vez que se produce la fractura del material es posible por reconocimiento visual determinar el tipo de fractura generado en las probetas de diferentes composiciones. Es así que en la probeta ensayada de polipropileno se observa la formación de un cuello de botella justo antes de fracturarse, el cual es un comportamiento típico de materiales con fracturas dúctiles (Figura 3.24).



Figura 3.24. Fractura en probeta de polipropileno.
(Fuente: Propia)

Por otro lado, en la Figura 3.25 y Figura 3.26, se observa las fracturas producidas en las probetas de biocompuesto con y sin compatibilizante (MAPP) respectivamente. En ambos grupos de probetas se observa una deformación despreciable antes de la fractura; este comportamiento es típico de materiales frágiles.



Figura 3.25. Fractura en probetas de biocompuesto con MAPP, de izquierda a derecha PP92-RH5-MAPP, PP82-RH15-MAPP y PP72-RH25-MAPP.
(Fuente: Propia)



Figura 3.26. Fractura en probetas de biocompuesto sin MAPP, de izquierda a derecha PP95-RH5, PP85-RH15 y PP75-RH25.
(Fuente: Propia)

En ambos grupos de composiciones, la fractura producida es perpendicular a la fuerza aplicada, además la fractura ocurre en lugares similares sobre la geometría de la probeta, lo que permite determinar que el ensayo se realizó con éxito.

En cada una de las composiciones se verifica que la dispersión del refuerzo es más uniforme en la matriz a medida que se aumenta la cantidad de refuerzo, esta dispersión es más notoria al realizar una microscopía óptica logrando determinar además discontinuidades presentes en la estructura del biocompuesto. En la Figura 3.27 y Figura 3.28 se muestran las microscopías ópticas de las composiciones de biocompuesto con y sin compatibilizante (MAPP) respectivamente.

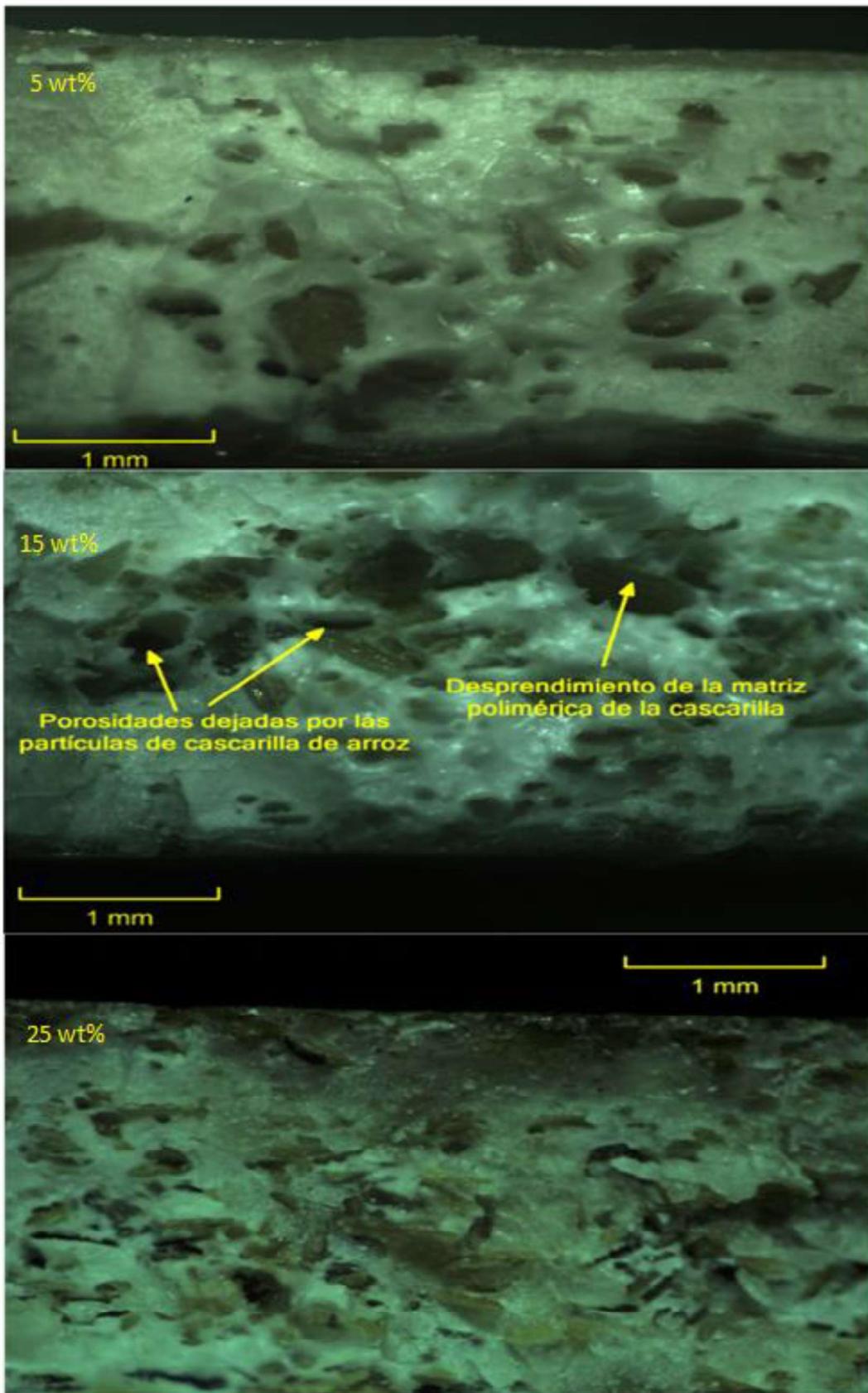


Figura 3.27. Microscopia óptica, sobre composiciones de biocompuesto sin MAPP. (Fuente: Propia)

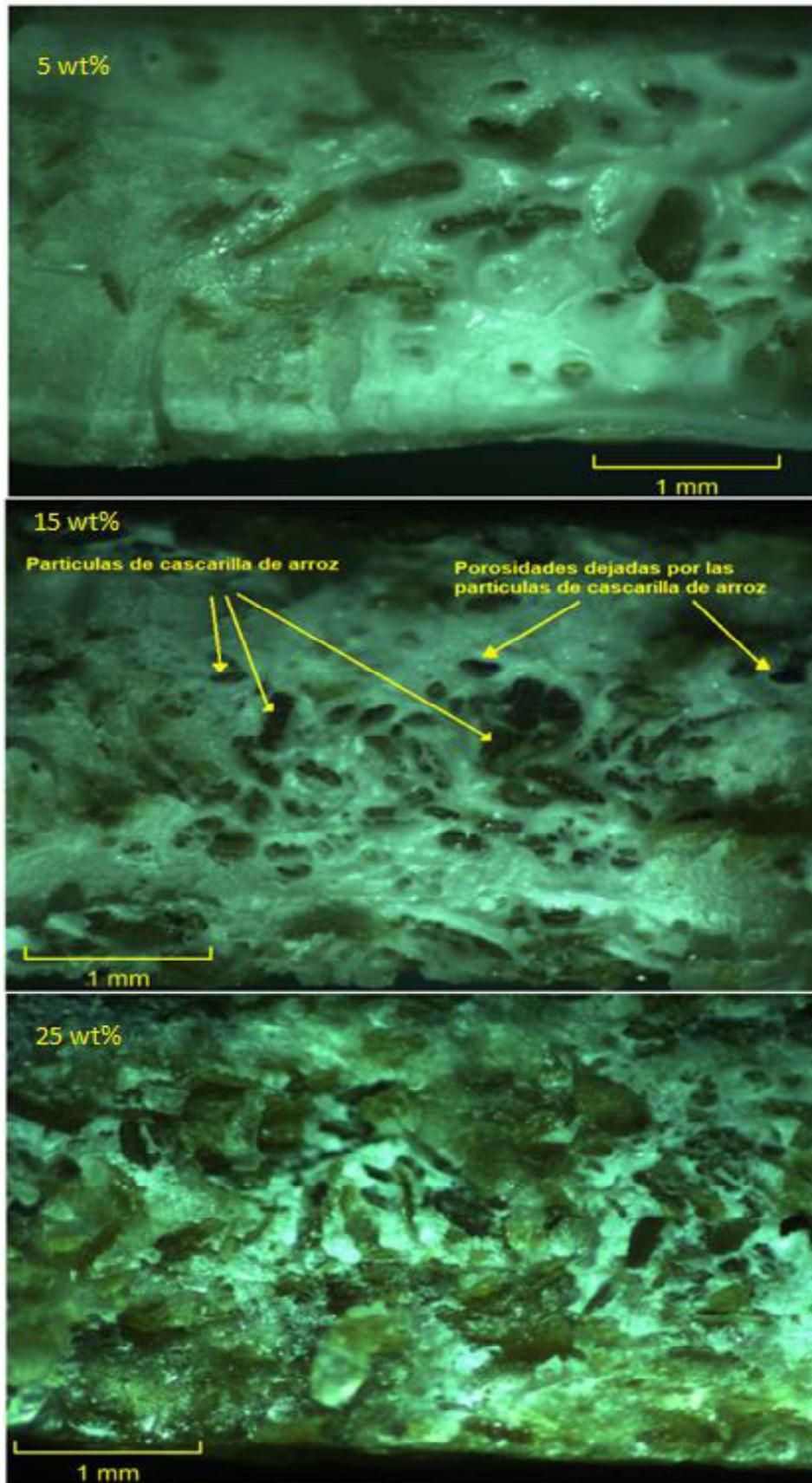


Figura 3.28. Microscopia óptica, sobre composiciones de biocompuesto con MAPP.
(Fuente: Propia)

En ambas microscopias es posible observar la existencia de poros en la estructura del material, estos se producen debido al desprendimiento del refuerzo desde la matriz polimérica al realizar el ensayo de tracción. En ambos casos se observa la superficie granular en la fractura, la cual es otra característica de las fracturas frágiles.

En la Figura 3.29 se representa mediante un gráfico de barras los valores obtenidos de resistencia a la tracción en rotura; se puede observar que todas las composiciones de biocompuesto tienen una mayor resistencia al momento de fracturarse con respecto a la resistencia presentada por el polipropileno. Adicionalmente se observa que existe un valor superior de resistencia en las composiciones que poseen compatibilizante, mejorando la resistencia a la tracción en rotura en 7%, 15% y 10% para las composiciones de 5%, 15% y 25% de refuerzo respetivamente.

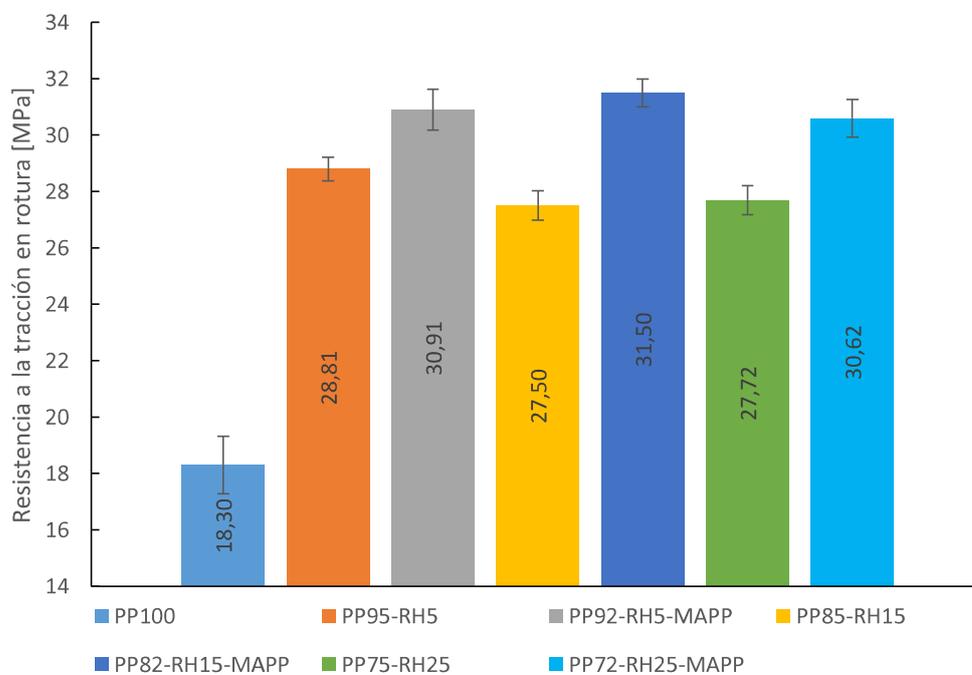


Figura 3.29. Resistencia a la tracción en rotura obtenida en el biocompuesto. (Fuente: Propia)

Es evidente la influencia que tiene el compatibilizante (MAPP) sobre el biocompuesto, con respecto al incremento de la resistencia a la tracción en rotura; pues mejora la interfase entre el refuerzo y la matriz, consolidando el compuesto y obteniendo una estructura mucho más sólida y resistente en el momento que se produce la fractura. El valor más alto de esta característica se presenta en la composición PP82-RH15-MAPP y se nota un incremento de alrededor de 72% con respecto al valor de resistencia registrado por el polipropileno.

En el módulo de elasticidad, es posible notar una tendencia creciente al agregar cascarilla de arroz como refuerzo en la matriz polimérica. Los refuerzos orgánicos en su mayoría influyen en el módulo de elasticidad de forma que al aumentar el porcentaje de refuerzo incrementa la magnitud de esta propiedad; este incremento se debe a la aglomeración de refuerzo en la matriz, lo que permite obtener una estructura rígida en el biocompuesto; por otro lado, el compatibilizante (MAPP) logra mejorar la interfase refuerzo-matriz, obteniendo un módulo de elasticidad más elevado en composiciones de biocompuesto con similar porcentaje de refuerzo. Este comportamiento se evidencia en estudios realizados por Álvarez et al (2012) [11], Ndiaye et al (2012) [29] y Dukarte et al (2006) [30].

En la Figura 3.30 se observa por separado mediante líneas de tendencia el incremento del módulo de elasticidad sobre las composiciones con y sin compatibilizante (MAPP).

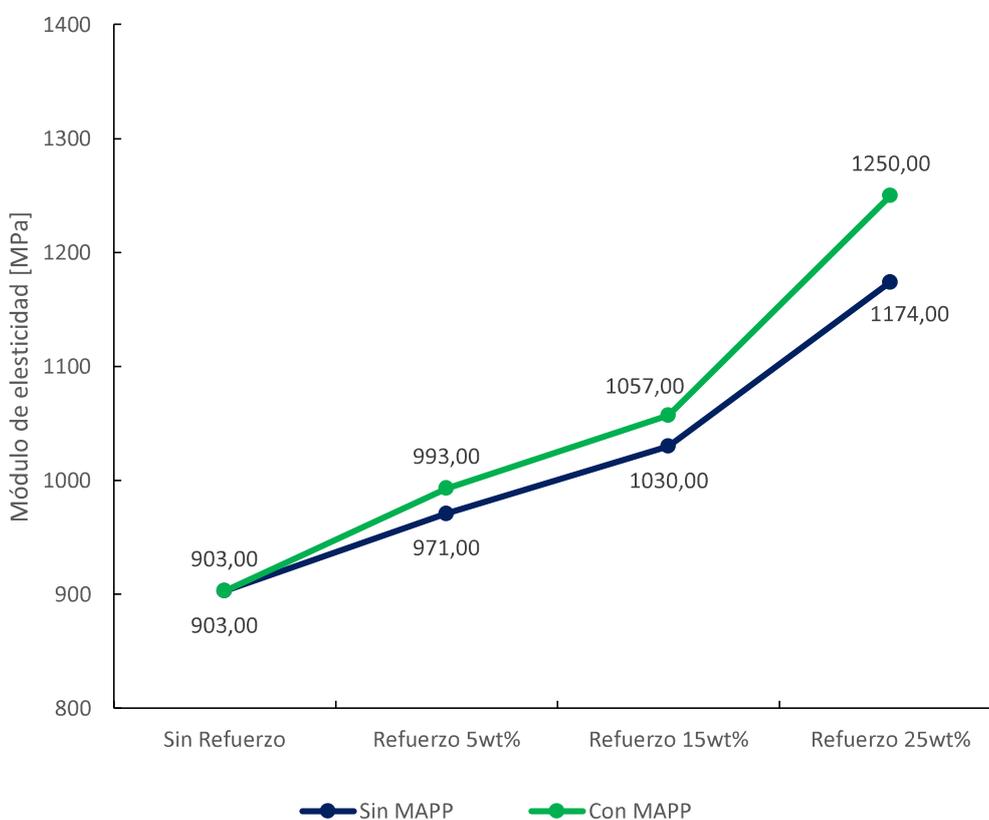


Figura 3.30. Módulo de elasticidad en el biocompuesto.
(Fuente: Propia)

La grafica anterior permite observar la influencia que tiene el compatibilizante (MAPP) en el biocompuesto, incrementando el módulo de elasticidad en 2%, 3% y 6% para las composiciones con 5%, 15% y 25% de refuerzo respectivamente. Este tipo de comportamiento se evidenció también en la investigación realizada por Ndiaye et al. (2012) [29]. La composición de biocompuesto PP72-RH25-MAPP posee el mayor módulo

de elasticidad, superando en alrededor del 38% al valor registrado por el polipropileno. Por otro lado, en la composición con similar cantidad de refuerzo PP75-RH25, el aumento del módulo de elasticidad es de alrededor del 30% nuevamente en relación al valor registrado por el polipropileno.

3.2.2. Ensayo de flexión

En la Tabla 3.21 se muestran los resultados obtenidos correspondientes a todas las muestras sometidas a flexión, las cuales incluyen al polipropileno y a todas las composiciones de biocompuesto.

Tabla 3.21. Características del polipropileno y el biocompuesto, obtenidos después de ser sometidos a flexión.

Composiciones	Resistencia a la flexión	Deformación en el esfuerzo máximo
	[MPa]	[%]
PP100	27,40	4,89
PP95-RH5	28,71	4,94
PP92-RH5-MAPP	30,81	4,97
PP85-RH15	30,79	4,93
PP82-RH15-MAPP	34,01	4,81
PP75-RH25	33,20	4,82
PP72-RH25-MAPP	39,70	4,80

(Fuente: Propia)

Los valores obtenidos en la tabla anterior son comparados considerando la cantidad de refuerzo presente en el biocompuesto, así como la adición o ausencia de compatibilizante (MAPP). Esta comparación se realiza mediante el uso de fotografías y gráficos estadísticos que evidencien la variación en la magnitud de las características obtenidas al realizar el ensayo de flexión. En la Figura 3.31 se muestran los valores de resistencia a la flexión mediante un gráfico de barras, en donde es posible comparar las características obtenidas de cada muestra analizada.

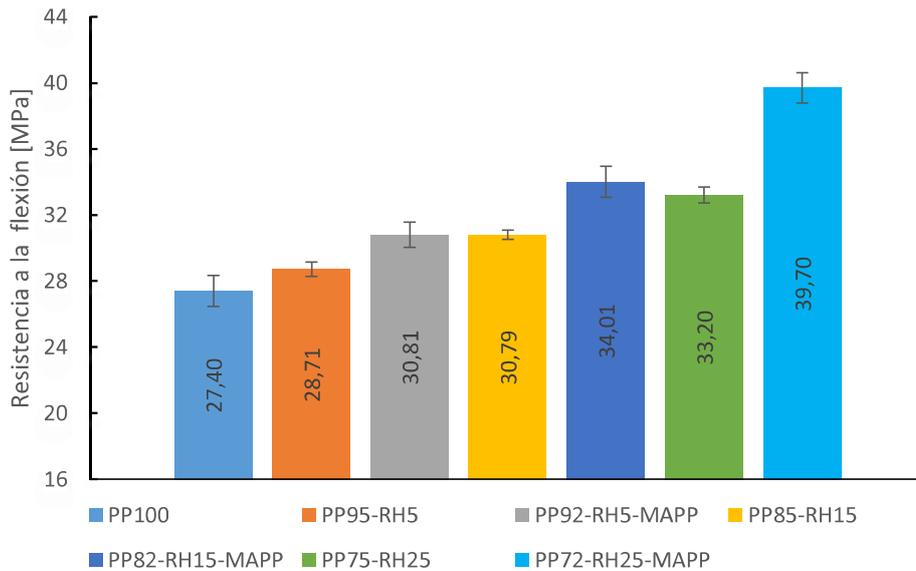


Figura 3.31. Resistencia a la flexión obtenida en el biocompuesto.
(Fuente: Propia)

En la figura anterior se observa el incremento de la resistencia a la flexión conforme aumenta la cantidad de refuerzo; el incremento en la magnitud de esta propiedad se produce debido a la disminución de la fluidez del material conforme aumenta la cantidad de refuerzo en la matriz, esto como consecuencia de la aglomeración de partículas de refuerzo a lo largo de la matriz, produciendo un material menos dúctil, más rígido y resistente a flexión; también al incluir compatibilizante (MAPP) en la estructura del biocompuesto se observa un aumento en la magnitud de esta propiedad en relación a las composiciones con similar porcentaje de refuerzo sin la presencia de compatibilizante (MAPP); este incremento de resistencia a la flexión en compuestos con compatibilizante (MAPP) se da en el orden de 7%, 10% y 20% para las composiciones con 5%, 15% y 25% de refuerzo respectivamente. Es evidente la influencia que tiene el compatibilizante sobre el biocompuesto, ya que permite una mejor adhesión entre las partículas de polipropileno y cascarilla de arroz, debido a que el compatibilizante mejora la nucleación del polipropileno alrededor de las partículas de cascarilla de arroz logrando una consolidación del biocompuesto mucho más eficiente, lo que deriva en una distribución de esfuerzos mucho más eficiente, logrando una resistencia a la flexión más alta en relación a composiciones con similar porcentaje de refuerzo.

La composición PP72-RH25-MAPP presenta un valor de resistencia a la flexión 45% mayor con respecto a la resistencia presentada por el polipropileno. Por otro lado, la composición con similar cantidad de refuerzo PP75-RH25, logra mejorar la resistencia a la flexión en aproximadamente 21% en relación al polipropileno.

Al ejecutar el ensayo de flexión las probetas tienden a deformarse, sin embargo, la naturaleza elástica del polipropileno permite lograr deformaciones elevadas, esta característica se mantiene en las composiciones de biocompuesto lo que permite flexionar el material sin llegar a fracturarlo. En la Figura 3.32 se muestra los valores de deformación máxima obtenidos al realizar el ensayo de flexión sobre todas las probetas.

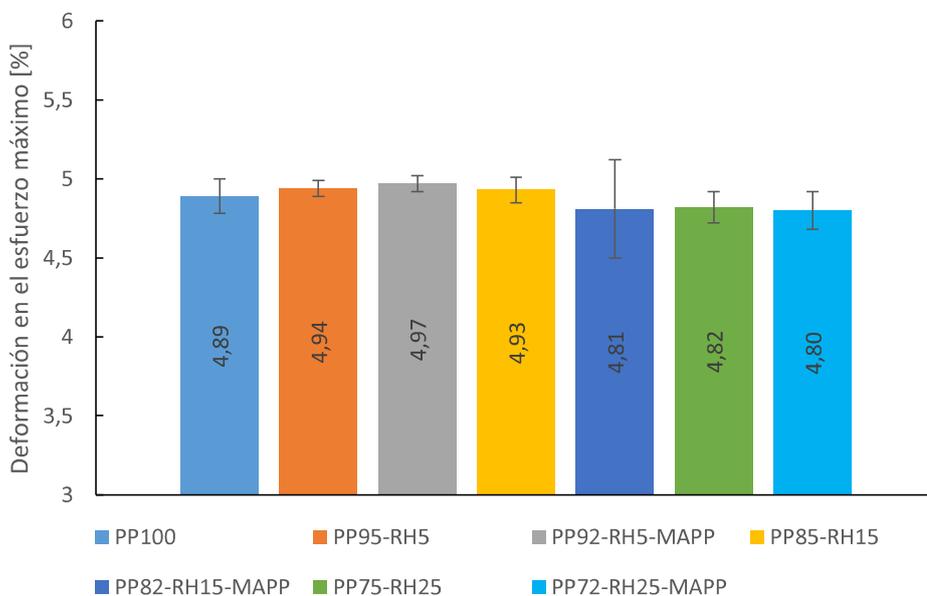


Figura 3.32. Deformación por flexión en el esfuerzo máximo.
(Fuente: Propia)

La deformación en todas las composiciones es mínima, sin embargo, es posible determinar el comportamiento del biocompuesto ya que al aumentar la cantidad de refuerzo la deformación en el esfuerzo máximo tiende a disminuir; además las composiciones de biocompuestos con compatibilizante (MAPP) se deforman en menor medida que sus contrapartes sin este. En cuanto a la deformación máxima, se observa una reducción de aproximadamente 2% en la composición PP72-RH25-MAPP, con respecto al polipropileno; esta reducción en la capacidad de deformación se debe a que el compatibilizante proporciona una mejor adhesión entre el refuerzo y la matriz, lo que deriva en enlaces más fuertes que permiten distribuir de mejor forma los esfuerzos aplicados en el material, logrando así mejorar la resistencia a la flexión y disminuyendo la deformación máxima.

3.2.3. Ensayo de impacto IZOD

En la Tabla 3.22 se muestran los resultados obtenidos para todas las composiciones ensayadas incluyendo al polipropileno y al biocompuesto.

Tabla 3.22. Características del polipropileno y el biocompuesto, obtenidos después de ser sometidas a impacto IZOD.

Composiciones	Energía de impacto	Resistencia al impacto
	[J]	[KJ/m ²]
PP100	6,48	72,18
PP95-RH5	1,64	18,26
PP92-RH5-MAPP	1,47	16,41
PP85-RH15	1,31	14,70
PP82-RH15-MAPP	1,30	14,48
PP75-RH25	1,05	11,78
PP72-RH25-MAPP	0,98	10,93

(Fuente: Propia)

Los valores detallados en la tabla anterior son comparados mediante gráficos estadísticos, los cuales permiten observar la variación en la magnitud de las características obtenidas a medida que varía la cantidad de refuerzo o se agrega compatibilizante (MAPP) en la estructura del biocompuesto.

En la Figura 3.33 se muestra mediante un gráfico de barras la variación existente en la energía de impacto al añadir cascarilla de arroz como refuerzo. La energía de impacto es aquella que el equipo necesita para romper la probeta y en el gráfico es muy evidente la influencia que tiene el refuerzo sobre esta propiedad, ya que la energía de impacto disminuye a medida que la cantidad de refuerzo aumenta; además la adición de compatibilizante (MAPP) disminuye la energía de impacto en composiciones con similar porcentaje de refuerzo.

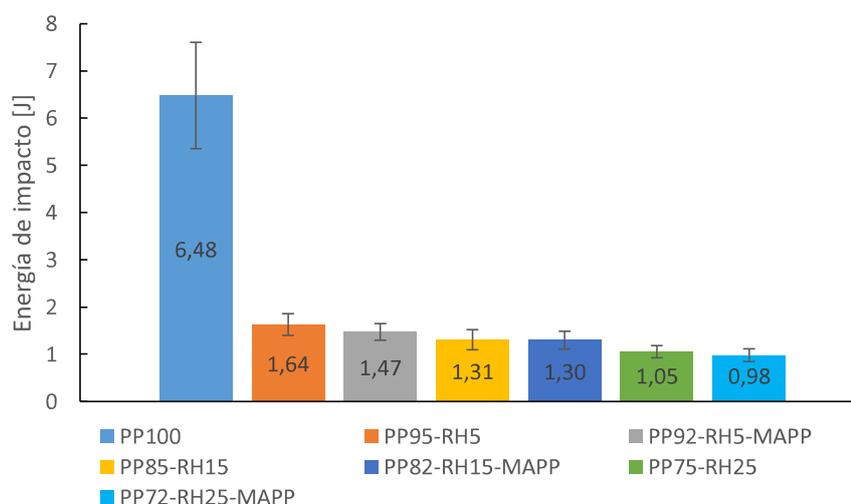


Figura 3.33. Energía de impacto absorbida por las composiciones al ser sometidas a impacto IZOD.
(Fuente: Propia)

En la gráfica anterior se observa que las composiciones que no poseen compatibilizante (MAPP) requieren de más energía por parte del equipo para fracturar la probeta; este valor extra de energía va en el orden del 11%, 1% y 7% para las composiciones de 5%, 15% y 25% de refuerzo respectivamente.

La composición PP72-RH25-MAPP requiere de menor cantidad de energía para fracturarse ya que necesita alrededor de 85% menos energía que la utilizada para fracturar el polipropileno; esto debido a que la cascarilla de arroz proporciona fragilidad al biocompuesto debido a que la aglomeración de refuerzo en la matriz actúa como un concentrador de esfuerzos en el material. Este comportamiento es típico en compuestos con refuerzos orgánicos lignocelulósicos, tal como lo detalla Nerenz et al (2012) [31] en su investigación. De igual manera el compatibilizante (MAPP) al mejorar la adhesión entre la matriz y el refuerzo forma una estructura más compacta y dura, lo que deriva en un material más frágil que requiere menos energía de impacto para fracturarse; Leal et al. (2009) [21] en su investigación reporto este comportamiento en composiciones con compatibilizante durante el ensayo de impacto IZOD.

En la Figura 3.34 se representa los valores registrados de resistencia al impacto mediante un gráfico de barras en el cual se observa que la resistencia al impacto disminuye a medida que se incrementa la cantidad de refuerzo en la matriz; además se evidencia que las composiciones con misma cantidad de refuerzo, pero con la presencia de compatibilizante (MAPP) tienen menor resistencia al impacto.

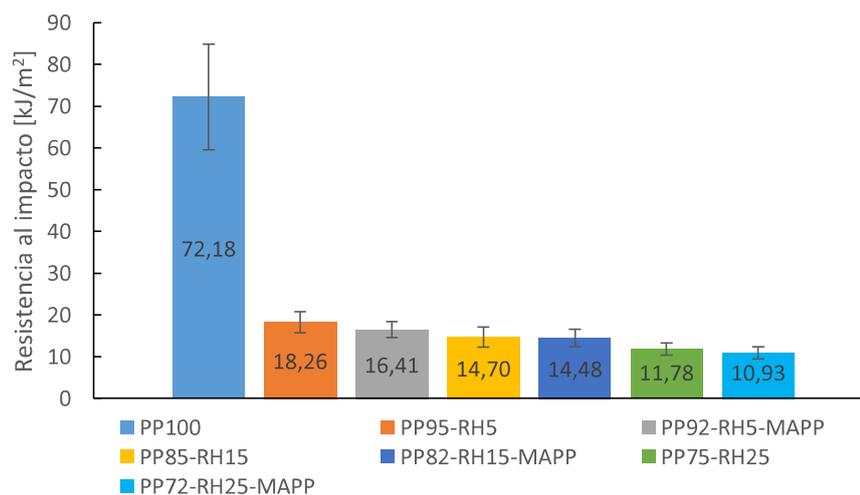


Figura 3.34. Resistencia al impacto por unidad de área, obtenida al realizar el ensayo de impacto IZOD.
(Fuente: Propia)

En la figura anterior se observa que existe mayor resistencia al impacto en las composiciones de biocompuesto sin compatibilizante (MAPP); este aumento de resistencia en comparación con las composiciones con compatibilizante (MAPP) va en el orden de 10%, 2% y 7% para las composiciones del 5%, 15% y 25% de refuerzo respectivamente. La composición PP72-RH25-MAPP presenta la menor resistencia al impacto, ya que esta se redujo aproximadamente 75% con respecto al valor registrado por el polipropileno. Esta reducción en la resistencia al impacto se debe a que la cascarilla de arroz actúa como un concentrador de esfuerzos que fragiliza la estructura del material y propaga fácilmente las grietas producidas durante el impacto; Yang et al. (2004) [22] registro un comportamiento similar en su investigación.

3.2.4. Ensayo de dureza

Al finalizar el ensayo de dureza sobre las probetas de flexión se recopiló los valores correspondientes a cada composición analizada; de forma que sea posible realizar una comparación entre los resultados obtenidos. En la tabla 3.23 se muestran los resultados de dureza obtenidos, especificados en la escala de dureza shore D

Tabla 3.23. Características del polipropileno y el biocompuesto, obtenidos después de ser sometidas al ensayo de dureza.

Composiciones	Dureza
	Shore D
PP100	43,95
PP95-RH5	52,65
PP92-RH5-MAPP	53,70
PP85-RH15	55,30
PP82-RH15-MAPP	56,30
PP75-RH25	58,05
PP72-RH25-MAPP	59,20

(Fuente: Propia)

Los valores detallados en la tabla anterior son comparados en un gráfico que permite observar la variación de la dureza obtenida. En la Figura 3.35 se observa mediante líneas de tendencias como aumenta la dureza a medida que se incrementa la cantidad de refuerzo sobre las composiciones con y sin compatibilizante (MAPP).

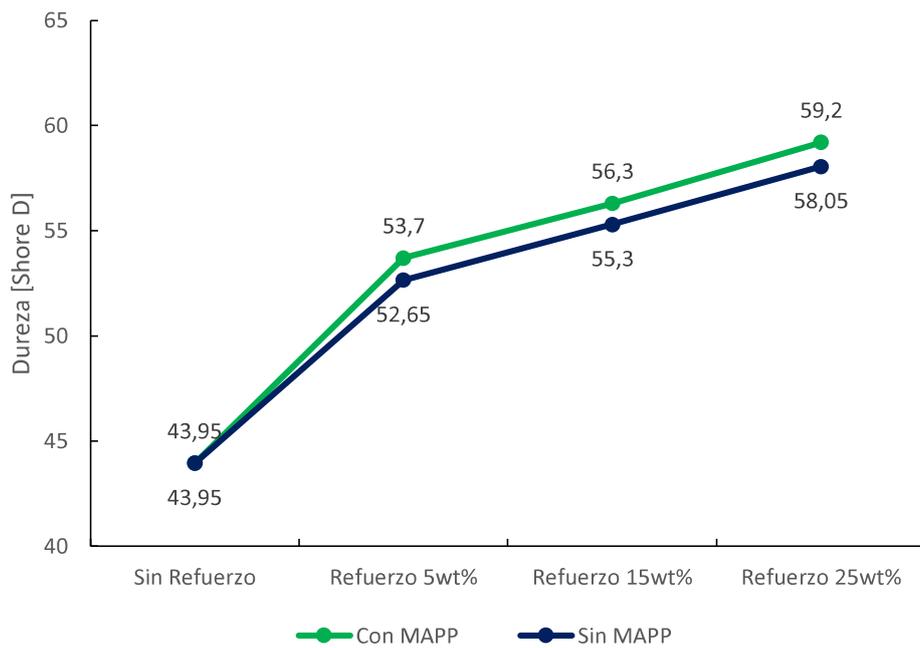


Figura 3.35. Dureza obtenida en las composiciones de biocompuesto.
(Fuente: Propia)

Todas las composiciones de biocompuesto superan la dureza presentada por el polipropileno, definiendo una tendencia creciente de esta característica a medida que incrementa la cantidad de refuerzo, esto como consecuencia de la aglomeración de partículas de refuerzo a lo largo de la matriz, consolidando un material más rígido, compacto y duro; además en composiciones con la misma cantidad de refuerzo, destacan con mayor dureza las composiciones que incluyen compatibilizante (MAPP) en su estructura ya que este provee una mejor adhesión entre la matriz y el refuerzo, lo que deriva en un material aún más compacto.

La composición PP72-RH25-MAPP presenta mayor dureza, superando en aproximadamente 35% el valor de dureza registrado por el polipropileno; por otro la composición sin compatibilizante (MAPP) PP75-RH25 supera la dureza del polipropileno en aproximadamente 32%. Comportamientos similares fueron observados en los estudios realizados por Pilaguano & Vizueta (2017) [24], Nerenz et al. (2012) [31] y Yuan et al. (2008) [32].

3.2.5. Análisis Termogravimétrico (TGA)

Finalizado el análisis termogravimétrico (TGA) se realizó una comparación grafica de los resultados obtenidos al degradar cada una de las muestras seleccionadas. En la Figura 3.36 se observa el porcentaje en peso de material degradado, al someter a cada una de las muestras a las condiciones de trabajo anteriormente expuestas.

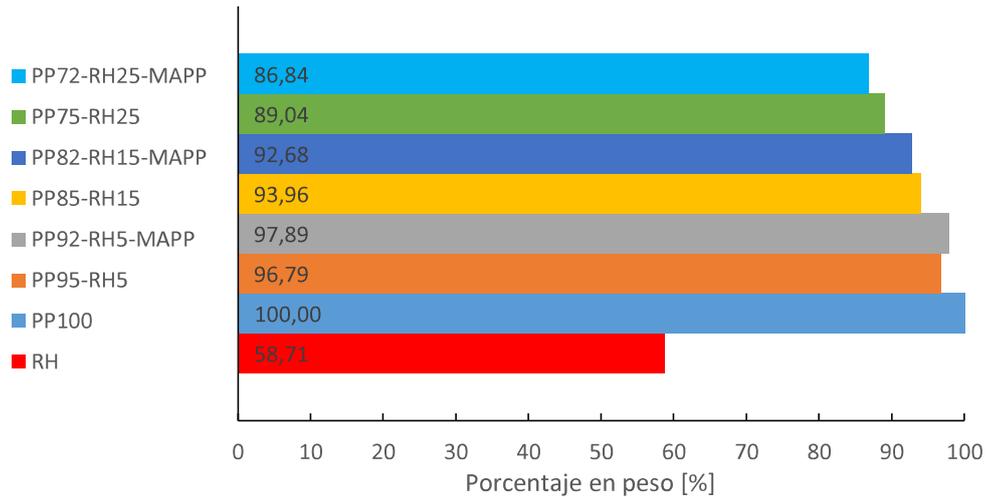


Figura 3.36. Porcentaje en peso de material degradado al realizar el análisis TGA.
(Fuente: Propia)

En la figura anterior se observa que la matriz de polipropileno se degrada completamente; mientras que la cascarilla de arroz al ser un material orgánico no se degrada en su totalidad, esto debido a que los compuestos lignocelulósicos forman residuos gaseosos y cenizas una vez que han sido expuestos a temperaturas elevadas; Cuervo et al. (2009) [33] en su investigación determinó un comportamiento similar en refuerzos lignocelulósicos sometidos a un análisis termogravimétrico (TGA).

En la Figura 3.37 se expone el comportamiento de la matriz, el refuerzo y el biocompuesto frente a la degradación producida al incrementar la temperatura, observando valores aproximados de donde inicia y finaliza la degradación de cada material.

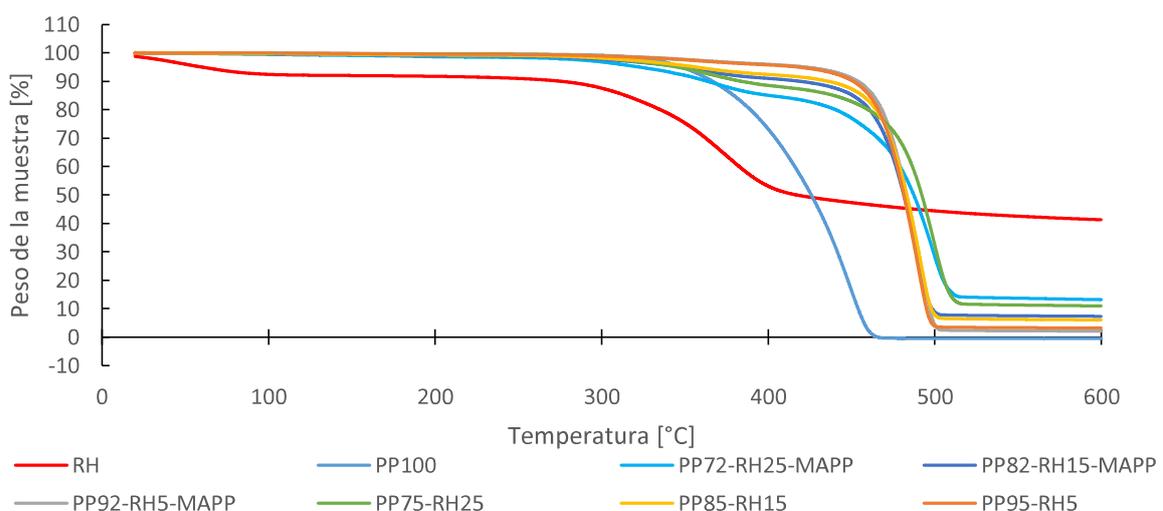


Figura 3.37. Comportamiento del biocompuesto, su matriz y refuerzo, al someterlos a análisis TGA.
(Fuente: Propia)

Los materiales lignocelulósicos por su naturaleza orgánica, absorben humedad con facilidad [33], por lo que en la gráfica anterior la curva que representa el comportamiento de la cascarilla de arroz muestra una leve variación debido a que el aumento de temperatura elimina la humedad existente en el material antes de llegar a los 100 °C; posteriormente la masa real de cascarilla de arroz que se utiliza para el análisis se estabiliza y se observa que la degradación de material inicia en aproximadamente 270 °C y finaliza en alrededor de 410 °C. Una vez superada la degradación se obtiene ceniza, en este residuo continuara descomponiéndose la lignina, hasta estabilizarse tal como se demuestra en el estudio realizado por Fisher et al. (2002) [34].

La curva que representa el comportamiento del polipropileno no tiene humedad por lo que antes de los 100°C no existirá la misma variación que se produjo en la curva del refuerzo. La degradación del polipropileno inicia aproximadamente a 300°C y finaliza en alrededor de 460°C, obteniendo una degradación total de la muestra analizada.

En las composiciones de biocompuesto la degradación ocurre a menor temperatura a medida que el porcentaje de refuerzo aumenta. En la gráfica anterior se observa que para las composiciones con 25%, 15% y 5% de refuerzo la degradación inicia aproximadamente a 260°C, 280°C y 300°C respectivamente; además, se observa que una vez finalizada la degradación del biocompuesto, las composiciones con 5% y 15% de refuerzo tienden a estabilizarse entre los 500 y 510 °C mientras que los biocompuestos con 25% de refuerzo tienden a estabilizarse a una temperatura entre los 510 y 520 °C.

En el biocompuesto, al incrementar la cantidad refuerzo en la matriz la degradación disminuye por lo que en la composición PP92-RH75-MAPP la degradación del material es menor en relación a las demás composiciones de biocompuesto. Este comportamiento se debe a que el refuerzo se transforma en ceniza, por tanto, a mayor porcentaje de refuerzo, mayor cantidad de residuos se obtendrá. Este tipo de comportamiento fue reportado por Cruz et al. (2006) [35] en su investigación.

También se observa que en las composiciones con 15% y 25% de refuerzo la degradación de material es menor sobre los compuestos que contienen compatibilizante (MAPP) en su estructura, esto se debe a que la inclusión de compatibilizante (MAPP) ayuda a la nucleación del polipropileno alrededor de la cascarilla de arroz obteniendo resultados más estables; por tanto, la degradación en el biocompuesto será más lenta, con dificultad al romper enlaces y más residuos no degradados. En la investigación realizada por Suzhou Yin et al. (1999) [36] se observó resultados similares.

3.2.6. Determinación de la densidad

Al finalizar los cálculos de la densidad del biocompuesto, es posible realizar una comparación en donde se evidencie la variación de la densidad al modificar la cantidad de refuerzo e incluir compatibilizante (MAPP) en la estructura del biocompuesto. La variación de la densidad en el material es mínima; esto debido a que la densidad del refuerzo es baja, de manera que la densidad del refuerzo no tendrá gran impacto sobre la densidad del polipropileno. En la Figura 3.38 se muestra la variación de la densidad conforme se adiciona refuerzo en la matriz.

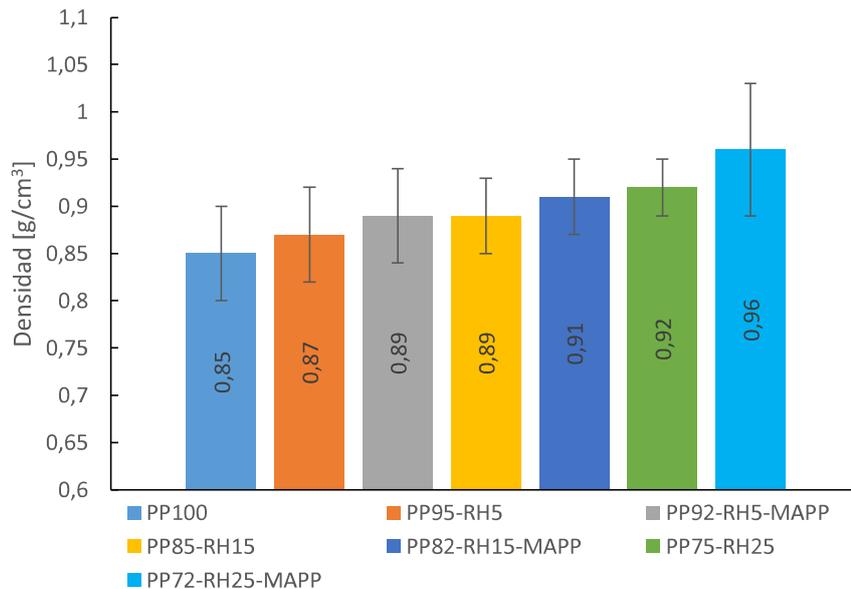


Figura 3.38. Variación de la densidad del biocompuesto en función del refuerzo y MAPP. (Fuente: Propia)

En la figura anterior se observa que la densidad de las composiciones de biocompuesto es mayor que la densidad presentada por el polipropileno, observando una tendencia creciente a medida que se adiciona cascarilla de arroz en la matriz de polipropileno. También se observa que, para composiciones similares, la adición de compatibilizante (MAPP) aumenta ligeramente el valor de la densidad; este aumento de densidad va en el orden del 2% para las composiciones con 5% y 15% de refuerzo, mientras que para la composición con 25% el aumento de la densidad es del 5%. El compuesto PP72-RH25-MAPP es el que tiene mayor densidad, logrando un aumento del 13% con respecto al valor de densidad registrado por el polipropileno.

Cada una de las composiciones de biocompuesto posee una densidad mayor que el polipropileno, puesto que al incrementar el refuerzo y añadir compatibilizante la densidad final del biocompuesto aumentará.

3.2.7. Espectroscopia infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR)

Una vez finalizada la espectroscopia infrarroja sobre cada material analizado se obtiene una espectrografía propia de cada material, por lo que es posible observar la influencia del refuerzo en la matriz; para ello se realiza una comparación entre cada espectrografía obtenida.

En la Figura 3.39 se observa los espectros correspondientes al polipropileno y a la cascarilla de arroz, los cuales se encuentran entre 4000 cm^{-1} y 500 cm^{-1} . Para la cascarilla de arroz los picos más relevantes se encuentran alrededor de 3300 cm^{-1} , otro grupo de picos se visualiza entre 2900 cm^{-1} y 2800 cm^{-1} , posteriormente se observan los picos entre 1700 cm^{-1} y 1600 cm^{-1} y finalmente un pico en aproximadamente 1000 cm^{-1} . En el polipropileno los picos más representativos de su espectro se encuentran aproximadamente entre 3000 cm^{-1} y 2800 cm^{-1} , otro grupo de picos entre 1450 cm^{-1} y 1350 cm^{-1} y varios picos menores entre 1200 cm^{-1} y 800 cm^{-1} .

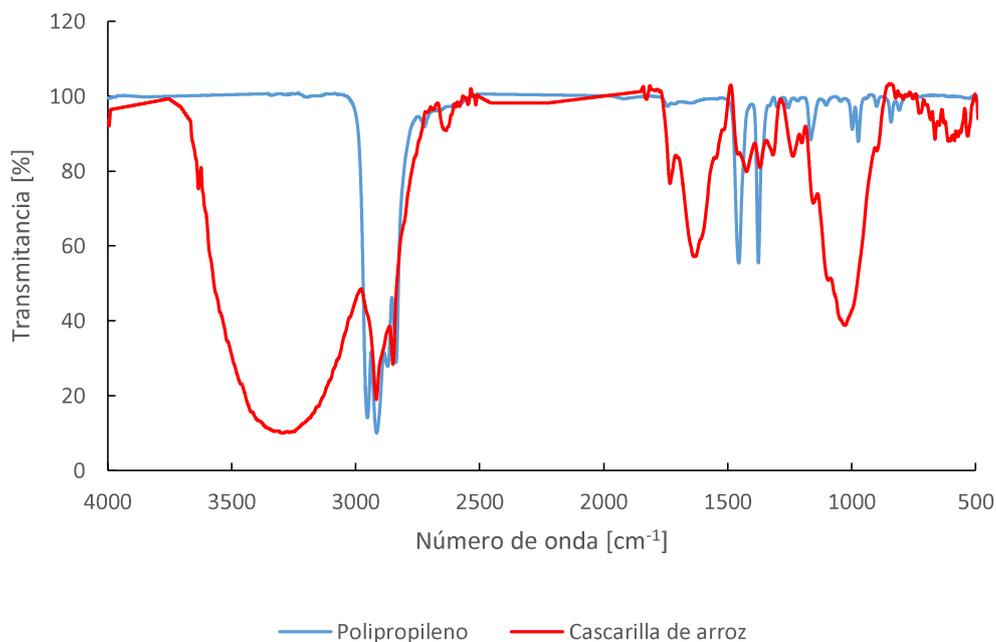


Figura 3.39. Espectrografía FTIR, Polipropileno vs Cascarilla de arroz.
(Fuente: Propia)

Con respecto a la espectroscopia FTIR de la cascarilla de arroz, el pico que se ubica alrededor de 3300 cm^{-1} corresponde a un tramo donde se estiran los enlaces O-H y se unen con H. Esto se debe a que el grupo de los hidroxilos se encuentra sobre la superficie de la lignina y son reactivos, pues tienden a cambiar la polaridad de la superficie de la lignina, lo que al final afecta la dispersión del material orgánico en una matriz de polímero hidrófobo; este comportamiento se verifica en estudios realizados por Seydibeyoğlu et al. (2018) [37] y Yeo et al. (2015) [38]. Los picos ubicados entre 2900 cm^{-1} y 2800 cm^{-1} se tratan de tramos donde

existen uniones C-H, propias de los metilos CH_2 y metilenos CH_3 . Los picos vuelven a presentarse, aunque en menor medida, alrededor de 1400 cm^{-1} ; esto se produce por el movimiento en los estiramientos del CH_2 . Alrededor de los 1600 cm^{-1} se observa la presencia de moléculas de agua, debido a que la celulosa absorbe agua y al no realizar un secado previo del material permitirá volver más notoria esta característica, además en este tramo se produce el estiramiento de los enlaces C-O; finalmente en el pico que se encuentra en alrededor de 1000 cm^{-1} se produce el estiramiento de los enlaces C-O, C-C y C-C-O. Los estudios realizados por Fu et al. (2009) [39], Fonseca Virginia (2013) [40] y Xu et al. (2013) [41] obtuvieron espectros similares a las detalladas en este estudio.

Con respecto a la espectroscopia FTIR del polipropileno, los picos que se encuentran entre los 3000 cm^{-1} y 2800 cm^{-1} representan el estiramiento de los enlaces C-H. Los picos entre los 1450 cm^{-1} y 1350 cm^{-1} , muestran enlaces propios de los metilos CH_2 y los metilenos CH_3 , tal como Fu et al. (2009) [39] y Jung et al. (2018) [42] reportaron en sus respectivos estudios. Finalmente, en el tramo entre los 1200 cm^{-1} y 800 cm^{-1} , se encuentran varios picos menores que se forman debido a la vibración de los enlaces CH_2 y estiramiento de los enlaces CH_3 , C-C, C- CH_3 y C-CH. Jung et al. (2018) [42] reportó este tipo de comportamiento en dicho intervalo.

Después de identificar los espectros propios de la matriz y el refuerzo se realiza una comparación entre los espectros de la matriz de polipropileno y el biocompuesto para con ello observar la influencia del refuerzo sobre la matriz; esta comparación se observa en la Figura 3.40.

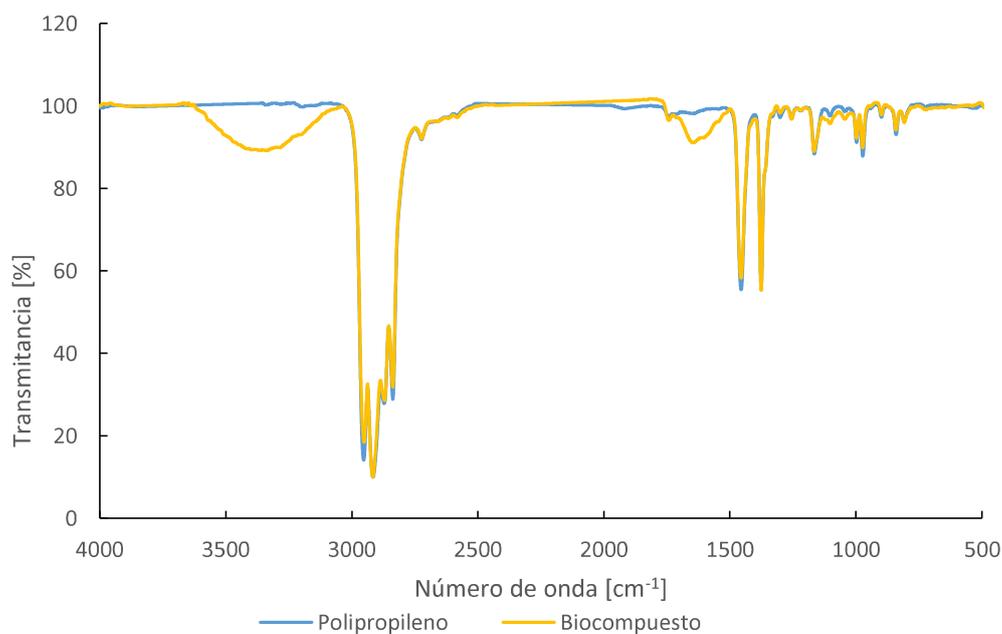


Figura 3.40. Espectrografía FTIR, Polipropileno vs Biocompuesto.
(Fuente: Propia).

En la figura anterior se observa el impacto que tiene la cascarilla de arroz sobre el polipropileno mediante la comparación de los espectros del polipropileno y el biocompuesto; los picos más representativos en el espectro del biocompuesto y ausentes en el polipropileno se encuentran en los 3300 cm^{-1} aproximadamente y otro que sobresale alrededor de los 1600 cm^{-1} . Estos dos picos son heredados de la cascarilla de arroz.

El pico ubicado alrededor de los 3300 cm^{-1} en el biocompuesto, representa el estiramiento de los enlaces H-OH; esta característica no existe en los materiales poliméricos hidrófobos por lo que el polipropileno carece de un pico de esta naturaleza; sin embargo, el biocompuesto adquiere esta característica debido al refuerzo. El pico que sobresale en los 1600 cm^{-1} es propio de los materiales lignocelulósicos, el cual no existe en el polipropileno al ser un material hidrófobo; por lo que esta característica la adquiere el biocompuesto desde el refuerzo logrando que los enlaces C-O existentes en el biocompuesto se estiren en este tramo.

3.3. Comparación de los resultados obtenidos

Una vez determinadas las propiedades del biocompuesto e identificadas las mejores de cada composición, se realiza un análisis comparativo de cada propiedad en relación a otros materiales compuestos.

3.3.1. Biocompuestos con cascarilla de arroz como refuerzo

Es posible realizar una comparación del biocompuesto obtenido en este estudio con respecto a otros biocompuestos que utilizan la cascarilla de arroz como refuerzo, por ello se ha seleccionado a varios estudios que cumplen con esta condición en los cuales la matriz utilizada es de naturaleza polimérica. Para el análisis se toma la composición de biocompuesto con el 25% de refuerzo y con compatibilizante (MAPP) por cuanto esta composición contiene buenas características mecánicas y representa una cantidad de refuerzo considerable en la estructura final del biocompuesto. Adicionalmente para la comparación con otros biocompuestos, se considera cantidades de refuerzo y compatibilizante similares a las utilizadas en este estudio de forma que puedan ser comparables.

Al realizar una breve revisión bibliográfica se conoce que entre las matrices poliméricas más utilizadas se encuentra el polipropileno (PP), el polietileno de alta densidad (HDPE), el policloruro de vinilo (PVC), el ácido poliláctico (PLA), el Poliéster, entre otros. En la Tabla 3.24 se detalla un resumen en donde se muestran las principales características de biocompuestos con las matrices mencionadas en conjunto con un refuerzo basado en cascarilla de arroz.

Tabla 3.24. Propiedades mecánicas de materiales compuestos con cascarilla de arroz como refuerzo y matrices poliméricas.

Compuesto	Porcentajes de refuerzo [%]	Compatibilizante [%]	Resistencia a la tracción [MPa]	Resistencia a la Flexión [MPa]	Resistencia al Impacto IZOD [KJ/m2]	Referencia
PP – Cascarilla de arroz	25,00	MAPP: 3,00	31,10	39,70	10,94	-
Poliéster – Cascarilla de arroz	20,00	-	32,53	89,70	-	[43]
PVC – Cascarilla de arroz	20,00	-	17,93	36,96	-	[44]
HDPE- Cascarilla de arroz	65,00	E-GMA: 2,50	22,50	49,06	-	[45]
PLA – Cascarilla de arroz	25,00	-	39,47	52,40	-	[46]

(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.24 es posible observar las características de cada material en las que se incluye la resistencia a la tracción y la resistencia a la flexión. Los estudios seleccionados carecen de resistencia al impacto, esto debido a la no incursión de los investigadores en la caracterización de la propiedad mecánica mencionada.

En lo que respecta a la presencia de compatibilizante, existe ausencia de este en varios de los biocompuestos analizados [43] [44] [46], mientras que en el biocompuesto con matriz de HDPE [45], se utiliza un compatibilizante distinto al de este estudio, esto se debe a que cada matriz polimérica trabaja de manera óptima con un agente compatibilizante distinto. La cantidad de refuerzo presente en los biocompuestos no es similar a la que se utiliza en este estudio, por lo cual se seleccionó la alternativa más próxima en cantidad de refuerzo.

En la Figura 3.41 se observa un gráfico de barras que muestra la diferencia que existe entre cada propiedad mecánica evaluada y su respectivo biocompuesto.

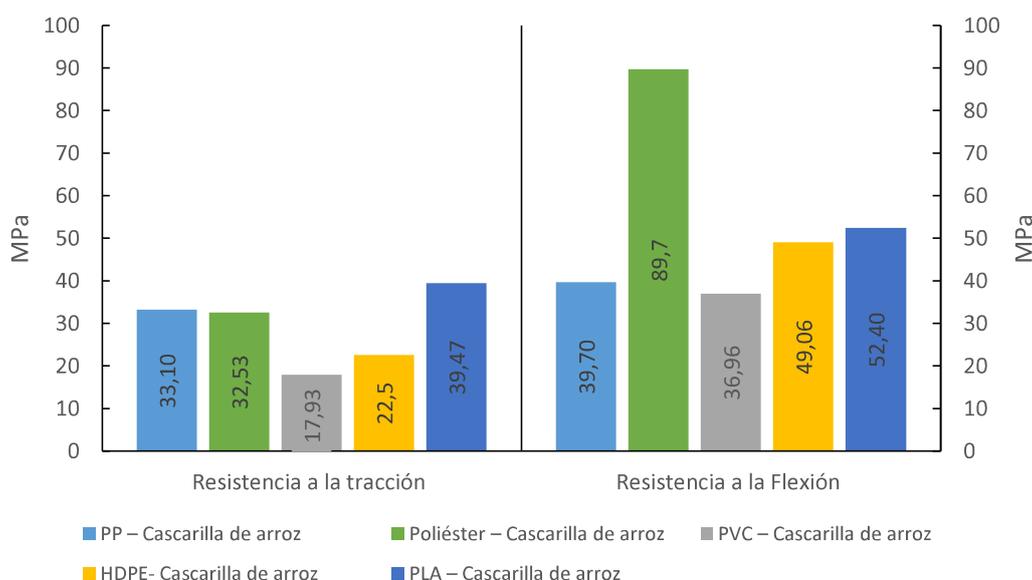


Figura 3.41. Biocompuestos con cascarilla de arroz como refuerzo.
(Fuente: Propia)

Tomando como punto de partida la resistencia a la tracción de los biocompuestos es posible notar la baja magnitud de esta propiedad en los biocompuestos que utilizan PVC como su matriz, presentando un valor 45% menor en relación al biocompuesto desarrollado en este estudio. Por otro lado, los biocompuestos que utilizan el PLA como matriz, presentan un valor 19% mayor que la resistencia a la tracción del biocompuesto desarrollado en este estudio.

En lo referente a la resistencia a la flexión se observa que los biocompuestos con poliéster como matriz, obtienen la mayor resistencia a la flexión, esto se debe a la excelente rigidez

que proporciona el poliéster, superando en un 126% a la resistencia del biomaterial desarrollado en este estudio. En contraste, el PVC presenta la menor resistencia a la flexión dentro de los biocompuestos analizados, presentando un 7% menos de resistencia con respecto a la obtenida en este estudio.

Es posible observar que el biocompuesto desarrollado en este estudio presenta unas propiedades mecánicas decentes, destacando como una gran alternativa en este grupo de biocompuestos; sin embargo, la utilización de cada material en determinadas actividades estará sujeta a otras condiciones como los costos del material utilizado como matriz, la disponibilidad de esta, el proceso de producción del material, e inclusive la naturaleza química de cada matriz y que en gran parte es heredada hacia el material desarrollado, por lo que la decisión final de la utilización de determinado material estará sujeta a lo expuesto anteriormente.

3.3.2. Biocompuestos con polipropileno como matriz

Es posible realizar un análisis comparativo con respecto a otros biocompuestos que posean una matriz similar a la utilizada en esta investigación. Por ello se ha seleccionado varios estudios en los cuales distintos refuerzos orgánicos particulados actúan en conjunto con el polipropileno como matriz para formar biocompuestos.

La composición de biocompuesto con el 25% de refuerzo con compatibilizante (MAPP), caracterizada en esta investigación, se selecciona para comparar las propiedades mecánicas con otros biocompuestos. Se considera cantidades de refuerzo y compatibilizante similares a los utilizados en la composición mencionada, tratando que exista similitud en los biocompuestos a comparar.

Al realizar una breve revisión bibliográfica se estableció como parámetro el uso de refuerzos orgánicos existentes en el Ecuador. Las características mecánicas de estos biocompuestos con refuerzos nacionales se detallan en la Tabla 3.25.

Tabla 3.25. Propiedades mecánicas de materiales compuestos, con refuerzos orgánicos y polipropileno como matriz.

Compuesto	Porcentajes de refuerzo [%]	Compatibilizante [%]	Resistencia a la tracción [MPa]	Resistencia a la Flexión [MPa]	Resistencia al Impacto IZOD [KJ/m ²]	Referencia
PP – Cascarilla de arroz	25,00	MAPP: 3,00	31,10	39,70	16,40	-
PP – Polvo de Pino	20,00	MAPP: 3,00	29,40	46,90	19,10	[47]
PP - Polvo de fruto de palmera	25,00	-	31,00	42,00	-	[48]
PP - Cascara de nuez	20,00	-	30,50	15,10	-	[49]
PP - Polvo de abedul	40,00	MAPP: 3,00	35,00	64,50	11,10	[50]
PP - Residuo de te	20,00	-	21,80	45,80	-	[51]
PP - Polvo de eucalipto	20,00	MAPP: 5,00	32,90	61,00	-	[52]
PP - Maíz en polvo	25,00	-	20,00	19,80	-	[53]

(Fuente: Propia)

Al observar la tabla anterior se nota que en la mayoría de los estudios analizados no se evaluó la resistencia al impacto. En lo que respecta al uso de compatibilizante se observa que varios de los estudios presentan un agente compatibilizante similar al utilizado en este estudio. También la cantidad de refuerzo utilizada en varios de los estudios analizados no es similar a la cantidad utilizada en este estudio, por lo que se considera para el análisis a la alternativa en porcentaje de refuerzo más próxima a la composición referencial.

En la Figura 3.42 es posible observar las propiedades mecánicas obtenidas de cada biocompuesto, donde se evidencia la diferencia entre cada biocompuesto frente a determinada propiedad.

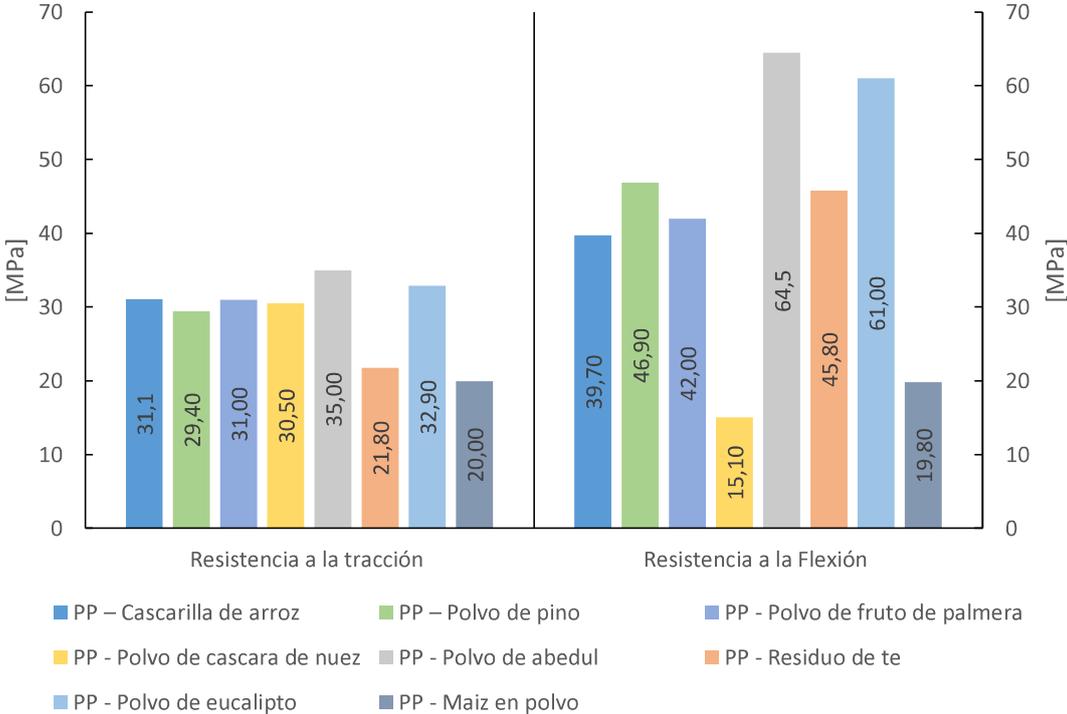


Figura 3.42. Biocompuestos con polipropileno como matriz.
(Fuente: Propia)

Al observar en la Figura 3.42 tomando como referencia el biocompuesto desarrollado en este estudio, es posible observar un incremento de la resistencia a la tracción en los biocompuestos con refuerzos madereros. El biocompuesto correspondiente a PP con polvo de abedul supera esta propiedad en un 12%. Por otro lado, se observa que en el caso del refuerzo a base de maíz en polvo y refuerzo de residuo de té la resistencia a la tracción es 36% y 30% menor respectivamente en relación a la resistencia obtenida en este estudio. Además, se observa que el resto de biocompuestos presentan valores de resistencia a la tracción similares que no varían más allá del 6%.

Al observar la figura anterior y centrándose en la resistencia a la flexión, tomando como referencia la composición desarrollada en este estudio, se evidencia que en varios biocompuestos existe un aumento o disminución en el valor de esta propiedad; además se nota que los refuerzos madereros responden mejor al someterlos a flexión, de manera que los biocompuestos que incluyen polvo de abedul y polvo de eucalipto, son los que mejor resistencia presentan, superando el valor obtenido por el biocompuesto con cascarilla de arroz en un 62% y 54% respectivamente. Por otro lado, los biocompuestos que incluyen refuerzos de maíz en polvo y partículas de cascara de nuez presentan valores de resistencia 61% y 50% menores que la obtenida en este estudio. El resto de biocompuestos presentan valores de resistencia a la flexión similares a la del polipropileno (PP) con cascarilla de arroz.

En lo que respecta a la resistencia al impacto IZOD la mayoría de los estudios analizados no presenta valores correspondientes a esta propiedad. Sin embargo, se observa que el biocompuesto que utiliza polvo de pino como refuerzo obtiene un valor de resistencia 16% mayor que la resistencia obtenida por el polipropileno (PP) con cascarilla de arroz.

Se observa que los biocompuestos, que presentan refuerzos madereros son los que obtienen valores más altos de resistencia en tracción, flexión e impacto. Por otro lado, el biocompuesto que utiliza polvo de maíz como refuerzo no presenta valores de resistencia en tracción y flexión que superen las características obtenidas al combinar el polipropileno (PP) con la cascarilla de arroz. Finalmente, el biocompuesto de polipropileno (PP) con partículas de fruto de palmera es el que presenta características mecánicas bastante similares a las del biocompuesto desarrollado en este estudio.

El biocompuesto desarrollado representa una gran alternativa al momento de seleccionar un material, debido a que presenta buenas propiedades mecánicas sin llegar a mostrar valores significativamente bajos de resistencia a tracción, flexión o impacto, frente a otros biocompuestos. La selección final del material depende de las condiciones finales de trabajo, así como de la facilidad de procesamiento de material y la disponibilidad del refuerzo necesario para el desarrollo del biocompuesto.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se muestran las conclusiones a las cuales la investigación ha llegado una vez que se ha realizado todo el procedimiento de caracterización del material, adicionalmente se adjunta recomendaciones a seguir en caso de realizarse futuros trabajos con biocompuestos similares.

4.1. Conclusiones

- Se logró satisfactoriamente caracterizar un biocompuesto de polipropileno reforzado con cascarilla de arroz, considerando variables como el porcentaje de refuerzo en la matriz, tamaño de partícula del refuerzo y la adición de un agente compatibilizante (MAPP).
- A medida que se aumenta la cantidad de refuerzo en la matriz, el biocompuesto disminuye su fluidez, por ende, a mayor cantidad de refuerzo se requieren velocidades de procesamiento más elevadas al extruir el material.
- La fluidez del material determina el tipo de fractura que se produce en el ensayo de tracción, por lo que se determinó la generación de una fractura frágil en el biocompuesto, y una fractura dúctil en la matriz de polipropileno.
- Al incrementar la cantidad de refuerzo en la matriz, la resistencia a la tracción varía en porcentajes bajos sin mostrar evidencia de una tendencia creciente o decreciente, por otro lado el módulo de elasticidad, la resistencia a la flexión, la densidad y la dureza aumentan su magnitud mientras que la resistencia al impacto IZOD disminuye. Todas estas propiedades comparadas en relación los valores presentados por el polipropileno.
- Se caracterizó biocompuesto con la presencia y ausencia de un agente compatibilizante (MAPP) y se determinó una mejor adhesión entre las partículas de la matriz y el refuerzo en las composiciones que poseen compatibilizante (MAPP)
- El compatibilizante (MAPP) actúa como un agente aglutinante en la estructura del biocompuesto, mejorando la nucleación y la consolidación del biocompuesto, este comportamiento es evidencio en cada una de las propiedades evaluadas en relación a las composiciones sin compatibilizaste (MAPP).
- Se comprobó que a medida que incrementa la cantidad de refuerzo en la matriz, la degradabilidad del biocompuesto es menor mientras aumenta la temperatura.
- La composición PP72-RH25-MAPP mostró mejores resultados en varias propiedades evaluadas en los ensayos realizados, logrando incrementos en la resistencia a la tracción en rotura, resistencia a la flexión, módulo de elasticidad y dureza en el orden de 67%, 45%, 38% y 35% respectivamente, con respecto a los valores registrados por

el polipropileno. Sin embargo, en la resistencia a la tracción, elongación máxima y resistencia al impacto, existen decrementos en el orden de 4%, 99% y 85% respectivamente, nuevamente en relación al polipropileno.

- Al finalizar el estudio se pudo realizar un análisis comparativo en los parámetros obtenidos con relación a estudios similares; en donde se verificó que las propiedades obtenidas en este estudio son competentes en relación a biocompuestos similares.

4.2. Recomendaciones

- Se sugiere un estudio similar con métodos de elaboración distinto, para evaluar el impacto final que cada tipo de procesamiento tiene en los biocompuestos.
- Se aconseja realizar un análisis de degradabilidad del material para determinar su interacción con el medio ambiente.
- Se recomienda variar el tamaño de partícula del refuerzo para la obtención de otra variedad de biocompuesto de manera que se pueda definir la influencia del tamaño de partícula en el mismo.
- Se recomienda realizar un biocompuesto con cascarilla de arroz en forma de fibra y comparar los resultados obtenidos con las propiedades desarrolladas en este estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. MALKAPURAM, V. KUMAR y Y. SINGH NEG, «Recent Development in Natural Fiber Reinforced Polypropylene Composites,» *REINFORCED PLASTICS AND COMPOSITES*, vol. 28, nº 10, pp. 1169 - 1189, 2009.
- [2] Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura, «Seguimiento del Mercado del Arroz de la FAO (SMA),» FAO, 2018 04 2018. [En línea]. Available: <http://www.fao.org/economic/est/publicaciones/publicaciones-sobre-el-arroz/seguimiento-del-mercado-del-arroz-sma/es/>. [Último acceso: 06 2019].
- [3] P. Pontón, V. Sotomayor, S. Galeas, J. L. Davila, N. Rosas y V. H. Guerrero, *Nuevos Materiales*, Quito: Victor Hugo Guerrero, 2011.
- [4] D. Isaac y I. Ori, *ENGINEERING MECHANICS*, New York: OXFORD UNIVERSITY PRESS, 2006.
- [5] A. Besednjak Dietrich, *Materiales Compuestos*, Barcelona: UPC 2005, 2005.
- [6] D. Hull, *Materiales Compuestos*, Barcelona: Reverte, S.A., 1987.
- [7] F. Stupenengo, *Materiales Compuestos*, Argentina: Instituto Nacional de Educación Tecnológica, 2011.
- [8] R. F. Gibson, *PRINCIPLES OF COMPOSITE MATERIAL MECHANICS*, New York: Founding , 2011.
- [9] P. Pepijn, *Composición Química De Diversos Materiales Lignocelulósicos De Interés Industrial Y Análisis Estructural De Sus Ligninas*, Sevilla: Universidad De Sevilla, 2010.
- [10] A. Prada y C. Cortés, «La descomposición térmica de la cascarilla de arroz: una alternativa de aprovechamiento integral,» *Orinoquia*, vol. 14, nº 1, pp. 155-170, 2010.
- [11] A. Alvarez, R. Salgado, E. Garcia, M. Dominguez, J. Granandos, A. Aguirre, R. Carmona y A. Morales , «APROVECHAMIENTO INTEGRAL DE LOS MATERIALES,» *Iberoamericana de Polímeros* , vol. 13, nº 4, pp. 140-150, 2012.
- [12] S. Kalpakjian, *Manufactura, Ingeniería Y Tecnología*, Mexico: Cuarta Edición, 2002, pp. 178-198.

- [13] W. D. Callister, *Ciencia e Ingeniería De Los Materiales*, Barcelona: Reverté, 2007.
- [14] X.-S. Y. & S. D. & L. Zhang, *Composite Materials Engineering*, vol. 1, China: Xiao-Su Yi, 2006.
- [15] M. Echeverria y O. Lopez, *Caracterización energética de cascarilla de arroz para su aplicación en generacion de energia termoeléctrica*, Quito: Escuela Politecnica Nacional, 2010.
- [16] L. Tipanluisa , Molina Jaime, S. Celi, J. Guasumba y G. Moreno , «Estudio experimental de la combustión de la cascarilla de arroz en una cámara de lecho fijo,» *Universidad Internacional SEK*, Quito, 2015.
- [17] M. Martinez, J. Ordieres, J. Botella, R. Sánchez y R. Parra, «Influencia del tamaño del grano en las propiedades mecánicas de los aceros inoxidables austeníticos,» *Revista de Metalurgia*, vol. 41, nº Extra, pp. 64-68, 2005.
- [18] N. M. Isa, A. R. Rahmat, N. Adenan, R. R. Ali y W. A. Rahman, «Rice Husk/High Density Polyethylene Bio-Composite: Effect of Rice Husk Filler Size and Composition on Injection Molding Processability with Respect to Impact Property,» *Advanced Materials Research Vols. 83-86* , pp. 367-374, December 2009.
- [19] 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 bio-composites,» *Composite Structures*, vol. 79, nº 3, pp. 369-375, 2007.
- [20] A. Bilal, *Manufacturing and Characterisation of Rice Husk Reinforced Polyethylene Composite Materials*, Auckland: University of Auckland, 2015.
- [21] S. M. Leal Rosa, 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.
- [22] H.-S. Yang, H.-J. Kim, J. Son , H.-J. Park, B.-J. Lee y T.-S. Hwang, «Rice-husk flour filled polypropylene composites; mechanical and morphological study,» *Composite Structures*, vol. 63, pp. 305-312, 2004.
- [23] L. F. Parra Cevallos, *Desarrollo de formulaciones a partir de Residuos de plastico de invernadero reciclado con poliolefinas*, Quito: Escuela Politecnica Nacional, 2011.

- [24] 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: ESCUELA POLITECNICA NACIONAL, 2017.
- [25] T. S. Da Cunha, Produção e caracterização de nanocompósitos de polipropileno, poliestireno-butadieno-estireno) e montmorilonita, Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.
- [26] D. Villamar, Caracterización de materiales compuestos lignocelulosicos obtenidos mediante extrusion, Quito: EPN, 2013.
- [27] J. Castro y C. Fajardo, Obtencion y caracterización de compuestos de polipropileno reforzado con nanoarcillas mediante extrusion e inyección, Quito: EPN, 2014.
- [28] M. Seydibeyoğlu, T. Uysalmana, E. Yakkana, M. Atagüra y K. Severb, «The influence of coupling agents on mechanical properties of lignin-filled polypropylene composites,» *Turkish Journal of Forestry*, vol. 19, nº 3, pp. 308-316, 2018.
- [29] D. Ndiaye, B. Diop, C. Thiandoume, P. Alioune Fall, A. Karim Farota y A. Tidjani, «Morphology and Thermo Mechanical Properties of Wood/Polypropylene Composites,» de *Polypropylene*, Saint-Louis, Gaston Berger University, 2012, pp. 415-428.
- [30] R. Balam-Cocom, S. Duarte y G. Ganche, «OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS DE FIBRAS DE LA “PIÑA” DE HENEQUÉN Y POLIPROPILENO,» *REVISTA MEXICANA DE INGENIERÍA QUÍMICA*, vol. 5, nº 1, pp. 39-44, 2006.
- [31] B. Nerenz, M. Fuqua, V. Chevali y C. Ulven, «Processing and Characterization of a Polypropylene Biocomposite Compounded with Maleated and Acrylated Compatibilizers,» Luqman Chuah Abdullah, North Dakota, 2012.
- [32] Q. YUAN, D. WU, J. GOTAMA y S. BATEMAN, «Wood Fiber Reinforced Polyethylene and Polypropylene Composites with High Modulus and Impact Strength,» *THERMOPLASTIC COMPOSITE MATERIALS*, vol. 21, pp. 195-208, 2008.
- [33] L. Cuervo, J. L. Folch y R. Quiroz, «Lignocelulosa Como Fuente de Azúcares Para la Producción de Etanol.,» *BioTecnología*, vol. 13, nº 3, pp. 11-25, 2009.

- [34] t. Fisher, B. Waymack, M. Hajaligol y K. Diane, «Pyrolysis Behaviour and Kinetics of Biomass Derived Materials,» *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 62, n° 2, pp. 331-349 , 2002.
- [35] R. Cruz-Estrada, P. Fuentes-Carrillo, O. Martínez-Domínguez, G. Canché-Escamilla y C. García-Gómez, «OBTENCIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS A BASE DE DESECHOS VEGETALES Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD,» *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, vol. 5, n° 1, pp. 29-34, 2006.
- [36] S. Yin, T. Rials y M. Wolcott, «Crystallization behavior of polypropylene and its effect on woodfiber composites A nproperties,» *The Fifth International Conference on Woodfiber-Plastic Composites*, pp. 139-146, 1999.
- [37] M. Seydibeyoğlu, T. Uysalmana, E. Yakkana, M. Atagüra y K. Severb, «The influence of coupling agents on mechanical properties of lignin-filled polypropylene composites,» *Turkish Journal of Forestry*, vol. 19, n° 3, pp. 308-316, 2018.
- [38] J.-S. Yeo, D.-W. Seong y S.-H. Hwang, «Chemical surface modification of lignin particle and its application as filler in the polypropylene composites,» *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 31, n° 15, pp. 80-85, 2015.
- [39] P. FU, S. HU, J. XIANG, L. SUN, T. YANG, A. ZHANG y J. ZHANG, «Mechanism Study of Rice Straw Pyrolysis by Fourier Transform Infrared Technique,» *Chinese Journal of Chemical Engineering*, vol. 17, n° 3, pp. 522-529, 2009.
- [40] V. Fonseca, PIRÓLISIS DE LOS RESIDUOS LIGNOCELULÓSICOS DEL HENEQUÉN PARA LA OBTENCIÓN DE BIOACEITE, Merida: CICY, 2013.
- [41] F. Xu, J. Yu, T. Tesso, F. Dowell y W. Dondhai, «Qualitative and quantitative analysis of lignocellulosic biomass using infrared techniques: A mini-review,» *Applied Energy*, vol. 104, pp. 801-809, 2013.
- [42] M. Jung, D. Horgen, S. Orski, V. Rodriguez, K. Beers, G. Balazs, T. Jones , T. Work, K. Brignac, S. Royer, D. Hyrenbach, B. Jensen y J. Lynch, «Validation of ATR FT-IR to identify polymers of plastic marine debris, including those ingested by marine organisms,» *Marine Pollution Bulletin*, vol. 127, pp. 704-716, 2018.
- [43] W. Surata, G. A. Kade Suriadi y K. Arnis, «Mechanical Properties of Rice Husks Fiber Reinforced Polyester Composites,» *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing.*, vol. 2, n° 2, pp. 165 - 168, 2014.

- [44] F. N. Azizul Rahman, A. Zafir Romli y M. H. Abidin, «The mechanical properties of rice husk/ recycle plasticized polyvinyl chloride composite,» *Advances in Environmental Biology*, vol. 8, nº 8, pp. 2615 - 2619, 2014.
- [45] S. Panthapulakkal, M. Sain y S. Law, «Effect of coupling agents on rice-husk-filled HDPE extruded profiles,» *Polymer International*, vol. 54, pp. 137-142, 2005.
- [46] F. Haider, A. Amir, M. Mucha y J. Xu, «The Influence of Alkaline Treatment on Mechanical Properties and Morphology of Rice Husk Fibre Reinforced Polylactic Acid,» *Advanced Materials Research*, vol. 911, pp. 13-17, 2014.
- [47] N. Stark y R. Rowlands, «EFFECTS OF WOOD FIBER CHARACTERISTICS ON MECHANICAL PROPERTIES OF WOOD/POLYPROPYLENE COMPOSITES,» *Wood and Fiber Science*, vol. 35, nº 2, pp. 167-174, 2003.
- [48] S. Audu Seth, I. Suleiman Aji y A. Tokan, «Effects of Particle Size and Loading on Tensile and Flexural Properties of Polypropylene Reinforced Doum Palm Shell Particles Composites,» *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences*, vol. 44, nº 1, pp. 231-239, 2018.
- [49] M. Obidiegwu, S. Nwanonenyi, I. Eze y I. Egbuna, «The Effect of Walnut Shell Powder on the Properties of Polypropylene Filled Composite,» *The International Asian Research Journal*, vol. 2, nº 1, pp. 22 - 29, 2014.
- [50] J. Kajaks, K. Kalnins, S. Uzulis y J. Matvejs, «Physical and Mechanical Properties of Composites Based on Polypropylene and Timber Industry Waste,» *Central European Journal of Engineering*, vol. 4, nº 4, pp. 385 - 390, 2014.
- [51] N. Kucukdogan, S. Ozturk y M. Sutcu, «Bio-composites based on polypropylene filled with waste of camellia sinensis,» *International Scientific Journal*, vol. 79, nº 1, pp. 12 - 18, 2016.
- [52] R. Maziero, K. Soares, A. Filho, A. Franco y J. Rubio, «Maleated Poly propylene ascoupling agent for polypropilene composites reinforced with Eucalyptus and Pinus particles,» *BioResources*, vol. 14, nº 2, pp. 4774 - 4791, 2019.
- [53] C. Onuoha, O. Onyemaobi, C. Anyakwo y G. Onuegbu, «Effect of Filler Content and Particle Size on the Mechanical Properties of Corn Cob Powder Filled Recycled Polypropylene Composites,» *International Journal of Scientific Engineering and Applied Science*, vol. 3, nº 4, pp. 145 - 151, 2017.

ANEXOS

Anexo I. Características polipropileno PH 1013 PETROQUIM

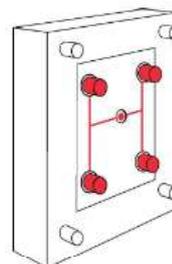


PH 1310
PP HOMOPOLÍMERO

PROCESO: INYECCIÓN

Indicado para moldeado por inyección. De fácil procesabilidad, posee una adecuada estabilidad durante el proceso, buena rigidez y balance de propiedades mecánicas. Recomendado para piezas de uso general con mediano espesor de pared.

Aplicaciones: Artículos domésticos, utensilios de cocina, Potes y bandejas para alimentos, Tapas y juguetes



RECOMENDACIONES DE PROCESAMIENTO

INYECCIÓN

Alimentación	180 °C
Tornillo	190 a 220 °C
Molde	20 a 60 °C

PROPIEDADES

PROPIEDADES TÍPICAS	ENSAYOS ASTM	UNIDADES	VALOR
Índice de Fluidez 2,16 kg/230 °C	D-1238/95	g/10 min	13
Temperatura de Ablandamiento VICAT (1 kg)	D-1525/97	°C	154
Temperatura de Deformación Térmica – HDT (455 kPa)	D-648/97	°C	95
Resistencia al Impacto IZOD a 23 °C	D-256/93	J/m	34
Resistencia a la Tracción (en el punto de fluencia)	D-638/97	MPa	34
Elongación (en el punto de fluencia)	D-638/97	%	12
Módulo de Elasticidad en Flexión	D-790/97	MPa	1.500

La Densidad de todos los grados de polipropileno producidos por Petroquim S.A. se encuentran en el rango de 0,905 +/- 0,005 g/cc

CONSIDERACIONES ESPECIALES:

1. Este polímero cumple con las especificaciones del FDA (Food and Drug Administration), de acuerdo con el Code of Regulations Title 21, Part 177-1520. Por lo tanto, puede ser utilizado en embalajes que tengan contacto con alimentos. Los respectivos certificados FDA de cada producto se encuentran disponibles en www.petroquim.cl. Adicionalmente cumple con Reglamento (UE) N°10/2011 y Normativa del Mercosur GMC-RES. N° 50/01.
2. Los datos listados corresponden a valores típicos medidos en nuestro laboratorio, y deben ser entendidos sólo como una guía en la selección y procesamiento de la resina. Por este motivo, antes de utilizar cualquier material producido por Petroquim S.A., se recomienda a cada usuario realizar, con el apoyo de nuestros técnicos especializados, las pruebas necesarias para determinar que dicho producto es adecuado para el uso previsto.
3. Los usuarios deben asegurarse también que pueden usar los productos Petroquim con las medidas legales y de seguridad necesaria (la ficha de seguridad se encuentra disponible en nuestra página web www.petroquim.cl).
4. Petroquim S.A., declina de toda responsabilidad que pueda surgir del mal uso directo o indirecto de esta información.
5. Los valores entregados anteriormente pueden ser modificados sin previa comunicación.
6. Esta versión anula y reemplaza a las ediciones anteriores.



REVISIÓN: Dic/2012

e-mail: info@petroquim.cl
Hernando de Aguirre 268
Providencia - Santiago - Chile
Fono: 56-2-23516700
www.petroquim.cl

Anexo II. Características Polipropileno maleizado (MAPP)

DuPont Packaging & Industrial Polymers



DuPont™ Fusabond® P613

Fusabond® resins Product Data Sheet

Description

Product Description DuPont™ Fusabond® P613 is an anhydride modified polypropylene.

Restrictions

Material Status • Commercial: Active
Availability • Globally

Typical Characteristics

Uses • Polymer Modifier
Applications Coupling agent, short glass fiber filled PP

Typical Properties

Physical	Nominal Values	Test Method(s)	
• Density ()	0.903 g/cm ³	ASTM D792	ISO 1183
• Melt Flow Rate (190°C / 1.0 kg measured)	49 g/10 min	ASTM D1238	ISO 1133
Melt Flow Rate (190°C / 2.16 kg calculated)	120 g/10 min		
Thermal	Nominal Values	Test Method(s)	
• Melting Point (DSC)	162°C (324°F)	ASTM D3418	ISO 3146

Processing Information

General
 • Maximum Processing Temperature 300°C (572°F)

FDA Status Information

Fusabond® P613 resin complies with Food and Drug Administration Regulation 21 CFR 175.105 - - Adhesives. This Regulation describes adhesives that may be used as components of articles intended for use in packaging, transporting, or holding food, subject to the limitations and requirements therein.

The information and certifications provided herein are based on data we believe to be reliable, to the best of our knowledge. The information and certifications apply only to the specific material designated herein as sold by DuPont and do not apply to use in any process or in combination with any other material. They are provided at the request of and without charge to our customers. Accordingly, DuPont cannot

Anexo III. Características técnicas Inyectora MILACRON MT55

MAGNA T 55



Technical Specifications

INJECTION UNIT	28mm Frame							32mm Frame								
	Metric	A	B	C	English	A	B	C	Metric	A	B	C	English	A	B	C
Injection Capacity, Maximum GPPS	gms	64	84	106	oz	2.2	2.9	3.7	gms	99	125	171	oz	3.5	4.4	6.0
Theoretical Displacement	cm ³	67	88	111	in ³	4.1	5.4	6.8	cm ³	104	132	180	in ³	6.3	8.0	10.9
Maximum Injection Pressure	bar	2068	1584	1251	psi	29540	22620	17870	bar	2074	1939	1204	psi	29620	23410	17200
Injection Rate	cm ³ /sec	87	114	144	in ³ /sec	5.3	6.9	8.7	cm ³ /sec	85	108	147	in ³ /sec	5.1	6.5	8.9
Screw Stroke	mm	110	110	110	in	4.33	4.33	4.33	mm	130	130	130	in	5.12	5.12	5.12
Screw Diameter	mm	28	32	36	in	1.10	1.26	1.42	mm	32	36	42	in	1.26	1.42	1.65
Screw L/D Ratio	L/D	23	20	17.7	L/D	23	20	17.7	L/D	22.6	20	17	L/D	22.6	20	17
Screw Speed	rpm	391	391	391	rpm	391	391	391	rpm	250	250	250	rpm	250	250	250
Screw Torque	Nm	428	428	428	in-lb	3788	3788	3788	Nm	676	676	676	in-lb	5983	5983	5983
At Pressure	bar	170	170	170	in-lb	2465	2465	2465	bar	172	172	172	in-lb	2494	2494	2494
Plasticizing Rate GPPS	gm/sec	10	14	18	oz/sec	0.3	0.4	0.6	gm/sec	9	12	18	oz/sec	0.3	0.4	0.6
Number of Pyrometers (Barrel/Nozzle)	qty	3/1		qty	3/1		qty	3/1		3/1		qty	3/1		3/1	
Total Heat Capacity	kW	6.4		kW	6.4		kW	7.3		7.3		kW	7.3		7.3	

CLAMP

Clamping Force	kN	500		ton	56		kN	500		ton	56	
Clamp Stroke	mm	280		in	11.0		mm	280		in	11.0	
Maximum Daylight	mm	630		in	24.8		mm	630		in	24.8	
Minimum Mold Height	mm	150		in	5.91		mm	150		in	5.91	
Maximum Mold Height	mm	350		in	13.78		mm	350		in	13.78	
Platen Size (H × V)	mm	500 × 485		in	19.69 × 19.10		mm	500 × 485		in	19.69 × 19.10	
Distance Between Tie Rods	mm	325 × 310		in	12.80 × 12.20		mm	325 × 310		in	12.80 × 12.20	
Tie Rod Diameter	mm	55		in	2.2		mm	55		in	2.2	
Ejector Stroke	mm	100		in	3.9		mm	100		in	3.9	
Ejector Force	kN	3.2		ton	3.5		kN	3.2		ton	3.5	
Dry Cycle Time (Euromap 6)	sec	2.5		sec	2.5		sec	2.5		sec	2.5	

GENERAL

Electrical Motor	kW	13.2		hp	18		kW	13.2		hp	18	
Total Oil Capacity	L	208		gal	55		L	208		gal	55	
Water Supply (29°C Inlet Temp)	L/min	40		gal/min	10.6		L/min	40		gal/min	10.6	
Connected Load	kW	19.6		kW	19.6		kW	20.5		kW	20.5	
Overall Dimensions (L × W × H)	m	3.5 × 1.2 × 2.1		ft	11.4 × 3.9 × 6.9		m	3.5 × 1.2 × 2.1		ft	11.4 × 3.9 × 6.9	
Machine Weight	kg	2,465		lbs	5,433		kg	2,465		lbs	5,433	

***Note: All machine dimensions and specifications are subject to change. Values are for reference only.



XINDA CORPORATION
TEL:+86-510-86537763
FAX:+86-510-86531436
www.xindacorp.com

POPULAR LAB USE

PSHJ-35 TWIN SCREW EXTRUDER



Parallel Co-rotating★Clam Shell Barrel★Segmented Screw Elements

It is equipped with segmented screws that can be quickly reconfigured to meet your specific needs. Its “clamshell” design makes screw changes and cleanouts quick and easy, adding to its versatility.



About PSHJ-35

Screw Diameter	RPM	L/D	Main Driver	Output
35mm	300/500	28/48	11/22KW	20/60KG

Anexo V. Tamices, según norma ASTM E11.

TAMICES



Malla con marco de acero inoxidable de 8 pulgadas de diámetro por 2 Pulgadas de altura con malla de acero inoxidable que cumple con la norma ASTM E11.

Malla No. 4	Apertura: 4,75 mm
Malla No. 5	Apertura: 4 mm
Malla No. 6	Apertura: 3,35 mm
Malla No. 8	Apertura: 2,36 mm
Malla No. 10	Apertura: 2 mm
Malla No. 12	Apertura: 1,7 mm
Malla No. 14	Apertura: 1,4 mm
Malla No. 16	Apertura: 1,18 mm
Malla No. 18	Apertura: 1 mm
Malla No. 20	Apertura: 850 μm
Malla No. 25	Apertura: 710 μm
Malla No. 30	Apertura: 600 μm
Malla No. 35	Apertura: 500 μm
Malla No. 40	Apertura: 425 μm
Malla No. 50	Apertura: 300 μm
Malla No. 60	Apertura: 250 μm
Malla No. 70	Apertura: 212 μm
Malla No. 80	Apertura: 180 μm
Malla No.100	Apertura: 150 μm
Malla No.120	Apertura: 125 μm
Malla No.140	Apertura: 106 μm
Malla No.170	Apertura: 90 μm
Malla No.200	Apertura: 75 μm
Malla No.230	Apertura: 63 μm
Malla No.270	Apertura: 53 μm
Malla No.325	Apertura: 45 μm
Malla No.400	Apertura: 38 μm
Malla No.500	Apertura: 25 μm
Malla No.635	Apertura: 20 μm

Anexo VI. Ensayo de tracción (Resultados)

Condiciones

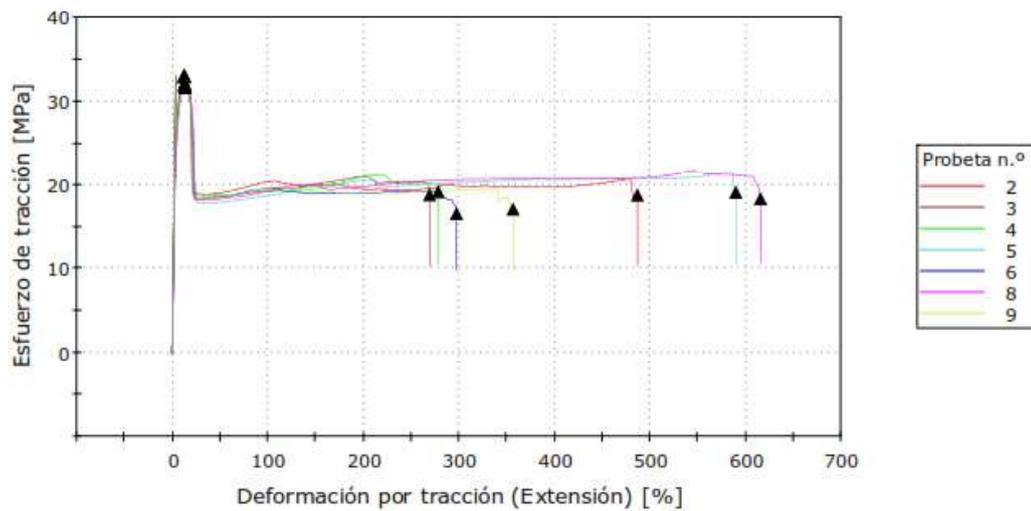


Instron Applications Laboratory

Descripción del método
ASTM D 638-10 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics

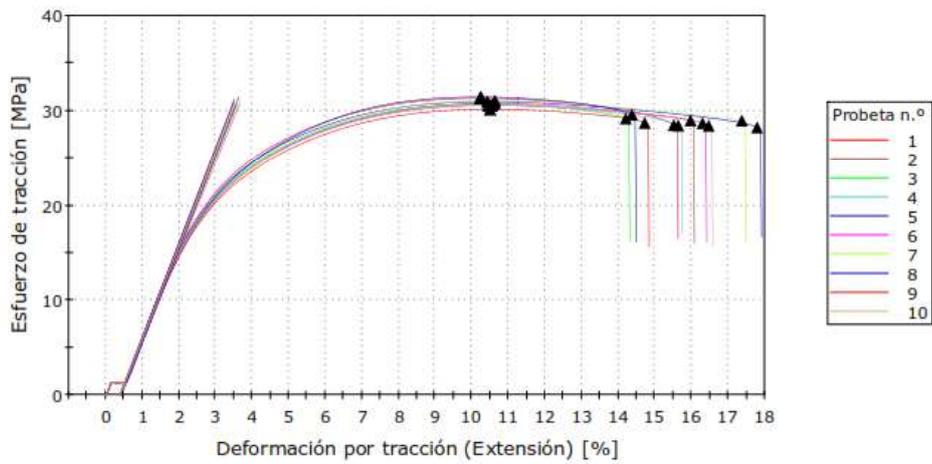
Conditioning procedure	
Preparation method	
Sample size	5
Sistema de unidades	SI
Extensometer Class	Class B-2
Origen principal	Extensión
Dumbell Type	Type I
Modo de control 1	Extensión
Velocidad 1	50,00000 mm/min
Temperature (C)	23,0
Humidity (%)	50,0
Method revision date	11/2008

PP100



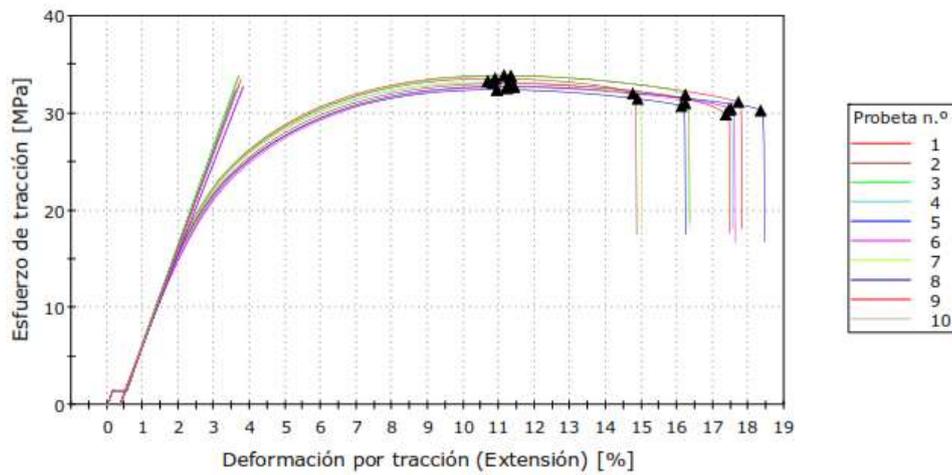
	Tensile Strength [MPa]	Tensile Strength at Yield [MPa]	% Elongation at Yield [%]	Tensile Strength at Break [MPa]	% Elongation at Break [%]	Modulus [MPa]	Módulo (Secant 1) [%]	Anchura [mm]	Espesor [mm]
2	33,0	33,0	12,9	18,8	486	945	573	13,3	3,30
3	33,0	33,0	12,6	18,8	269	928	575	13,3	3,30
4	32,9	32,9	12,5	19,2	278	935	576	13,3	3,30
5	32,0	32,0	13,0	19,1	589	901	534	13,3	3,30
6	32,1	32,1	13,0	16,6	297	903	509	13,3	3,30
8	31,6	31,6	13,7	18,3	615	840	420	13,3	3,30
9	31,9	31,9	13,2	17,1	356	870	490	13,3	3,30
Media	32,4	32,4	13,0	18,3	413	903	525	13,3	3,30
S.D.	0,600	0,600	0,406	1,024	148,732	37,7	57,552	0,000	0,000

PP95-RH5



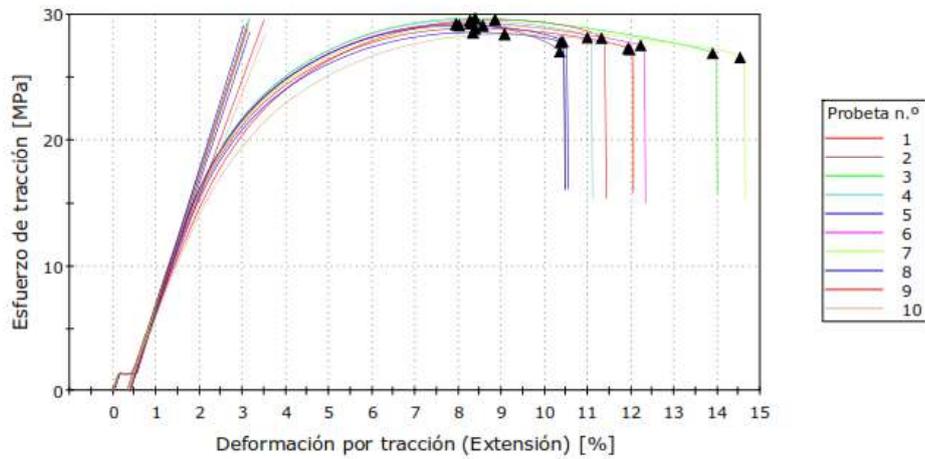
	Tensile Strength [MPa]	Tensile Strength at Yield [MPa]	% Elongation at Yield [%]	Tensile Strength at Break [MPa]	% Elongation at Break [%]	Modulus [MPa]	Módulo al Modulus (Secant 1) [%]	Anchura [mm]	Espesor [mm]
1	31,3	31,3	10,2	28,5	15,5	999	600	13,3	3,30
2	30,5	30,5	10,5	29,0	16,0	960	575	13,3	3,30
3	30,7	30,7	10,5	29,2	14,2	973	592	13,3	3,30
4	30,6	30,6	10,4	28,4	15,6	978	578	13,3	3,30
5	30,9	30,9	10,4	28,2	17,8	993	594	13,3	3,30
6	30,7	30,7	10,6	28,7	16,3	939	562	13,3	3,30
7	31,0	31,0	10,6	28,9	17,4	947	561	13,3	3,30
8	31,5	31,5	10,2	29,6	14,4	986	533	13,3	3,30
9	30,1	30,1	10,5	28,7	14,7	967	580	13,3	3,30
10	30,6	30,6	10,5	28,4	16,5	968	586	13,3	3,30
Media	30,8	30,8	10,5	28,8	15,8	971	576	13,3	3,30
S.D.	0,392	0,392	0,137	0,405	1,200	19,1	19,837	0,000	0,000

PP92-RH5-MAPP



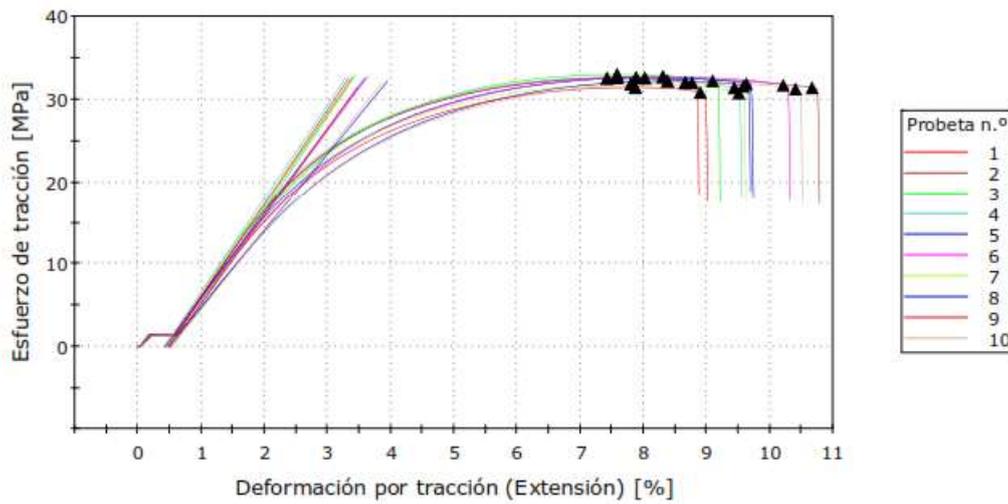
	Tensile Strength [MPa]	Tensile Strength at Yield [MPa]	% Elongation at Yield [%]	Tensile Strength at Break [MPa]	% Elongation at Break [%]	Modulus [MPa]	Módulo al Modulus (Secant 1) [%]	Anchura [mm]	Espesor [mm]
1	33,9	33,9	11,1	31,2	17,7	1020	627	13,3	3,30
2	33,6	33,6	10,9	32,0	14,7	985	615	13,3	3,30
3	33,8	33,8	11,3	31,9	16,2	1030	619	13,3	3,30
4	33,1	33,1	10,8	30,4	17,4	1020	623	13,3	3,30
5	32,7	32,7	11,2	30,3	18,3	947	599	13,3	3,30
6	32,7	32,7	11,4	30,4	17,5	939	600	13,3	3,30
7	33,3	33,3	10,7	31,5	14,9	1010	619	13,3	3,30
8	32,4	32,4	10,9	30,7	16,1	1000	606	13,3	3,30
9	33,0	33,0	11,3	29,9	17,4	990	597	13,3	3,30
10	32,6	32,6	11,2	31,1	16,2	986	604	13,3	3,30
Media	33,1	33,1	11,1	30,9	16,6	993	611	13,3	3,30
S.D.	0,507	0,507	0,243	0,724	1,208	30,0	11,033	0,000	0,000

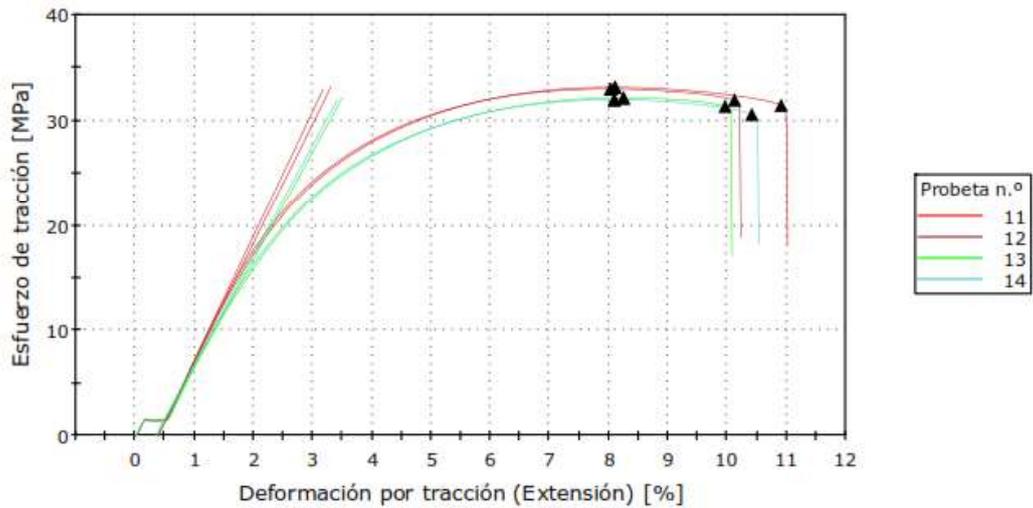
PP85-RH15



	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	29,6	29,6	8,85	28,1	11,3	932	610	13,3	3,30
2	29,2	29,2	7,95	27,0	10,3	1040	700	13,3	3,30
3	29,7	29,7	8,39	26,9	13,9	1060	664	13,3	3,30
4	29,5	29,5	8,28	28,2	11,0	1070	634	13,3	3,30
5	28,5	28,5	8,34	27,8	10,4	1030	622	13,3	3,30
6	29,3	29,3	8,29	27,5	12,2	1080	649	13,3	3,30
7	29,1	29,1	8,57	26,6	14,5	1070	649	13,3	3,30
8	29,1	29,1	8,02	27,8	10,4	1110	650	13,3	3,30
9	28,9	28,9	8,39	27,3	11,9	1060	631	13,3	3,30
10	28,4	28,4	9,07	27,2	12,0	884	599	13,3	3,30
Media	29,1	29,1	8,41	27,5	11,8	1030	641	13,3	3,30
S.D.	0,416	0,416	0,342	0,523	1,451	70,9	28,706	0,000	0,000

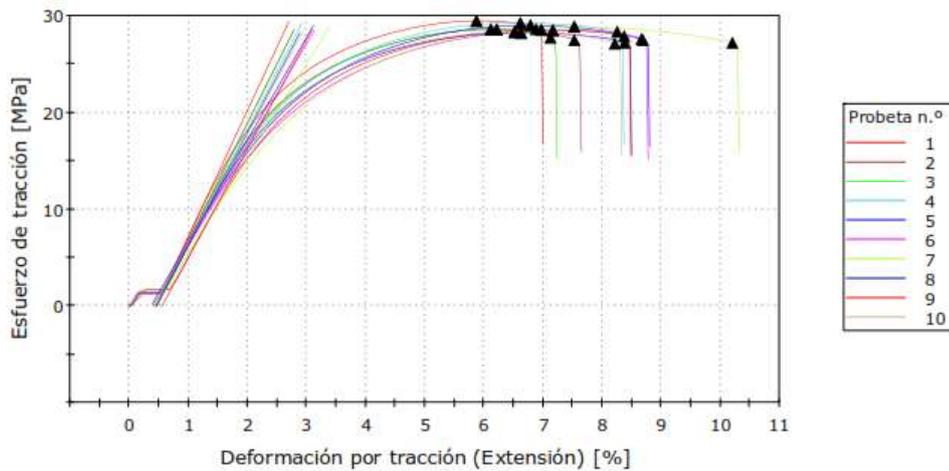
PP82-RH15-MAPP





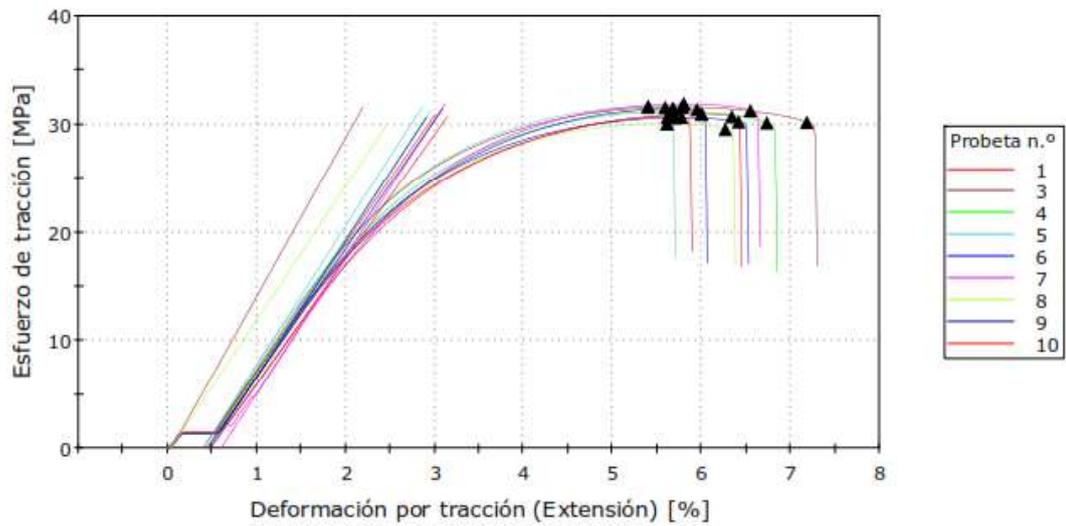
	Tensile Strength [MPa]	Tensile Strength at Yield [MPa]	% Elongation at Yield [%]	Tensile Strength at Break [MPa]	% Elongation at Break [%]	Modulus [MPa]	Módulo al Modulus (Secant 1) [%]	Anchura [mm]	Espesor [mm]
1	32,6	32,6	7,57	32,0	8,76	1110	611	13,3	3,30
2	32,6	32,6	7,87	31,4	10,7	1140	593	13,3	3,30
3	33,0	33,0	7,57	32,2	9,09	1130	528	13,3	3,30
4	32,5	32,5	7,41	31,4	9,43	1130	658	13,3	3,30
5	32,6	32,6	8,01	31,9	9,62	1020	600	13,3	3,30
6	32,7	32,7	8,30	31,7	10,2	1020	576	13,3	3,30
7	31,8	31,8	7,79	30,7	9,50	1080	649	13,3	3,30
8	32,2	32,2	8,38	31,6	9,57	926	468	13,3	3,30
9	31,4	31,4	7,86	30,8	8,89	1060	521	13,3	3,30
10	32,0	32,0	8,66	31,2	10,4	956	454	13,3	3,30
11	33,1	33,1	8,10	31,4	10,9	1130	693	13,3	3,30
12	33,0	33,0	8,03	31,9	10,1	1190	710	13,3	3,30
13	32,1	32,1	8,24	31,3	9,96	1030	644	13,3	3,30
14	32,0	32,0	8,09	30,6	10,4	1040	674	13,3	3,30
Media	32,4	32,4	7,99	31,4	9,82	1070	599	13,3	3,30
S.D.	0,489	0,489	0,342	0,491	0,660	74,8	80,718	0,000	0,000

PP75-RH25



	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	29,4	29,4	5,87	28,6	6,88	1310	712	13,3	3,30
2	28,6	28,6	6,21	27,5	7,52	1220	669	13,3	3,30
3	28,6	28,6	6,11	27,7	7,12	1220	662	13,3	3,30
4	29,2	29,2	6,61	28,3	8,25	1190	628	13,3	3,30
5	29,0	29,0	6,78	27,5	8,68	1050	660	13,3	3,30
6	28,5	28,5	7,16	27,6	8,66	1040	617	13,3	3,30
7	28,8	28,8	7,52	27,2	10,2	977	544	13,3	3,30
8	28,2	28,2	6,62	27,2	8,37	1160	625	13,3	3,30
9	28,5	28,5	6,97	27,9	8,37	1120	495	13,3	3,30
10	28,3	28,3	6,51	27,1	8,21	1120	656	13,3	3,30
Media	28,7	28,7	6,64	27,7	8,22	1140	627	13,3	3,30
S.D.	0,398	0,398	0,499	0,493	0,934	99,3	63,922	0,000	0,000

PP72-RH25-MAPP



	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	31,0	31,0	6,00	30,7	6,33	1190	715	13,3	3,30
3	31,6	31,6	5,78	30,2	7,18	1470	737	13,3	3,30
4	31,2	31,2	5,67	30,1	6,73	1240	699	13,3	3,30
5	31,6	31,6	5,39	31,6	5,59	1280	777	13,3	3,30
6	30,6	30,6	5,69	30,2	6,41	1260	664	13,3	3,30
7	31,9	31,9	5,80	31,3	6,54	1270	500	13,3	3,30
8	30,1	30,1	5,61	29,5	6,26	1230	593	13,3	3,30
9	31,5	31,5	5,67	31,4	5,95	1190	664	13,3	3,30
10	30,7	30,7	5,62	30,7	5,77	1150	598	13,3	3,30
Media	31,1	31,1	5,69	30,6	6,31	1250	661	13,3	3,30
S.D.	0,587	0,587	0,163	0,673	0,492	90,7	85,157	0,000	0,000

Anexo VII. Ensayo de flexión (Resultados)

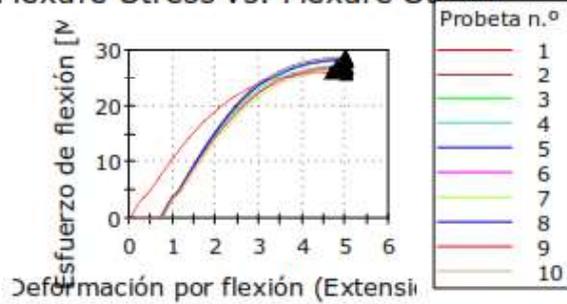
PP100

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



Flexure Stress vs. Flexure Strain

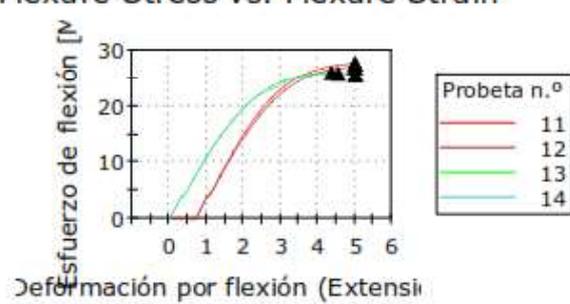


Tabla de resultados 1

	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	13,5	4,20	26,0	25,8	25,8	4,65	2220	1060	1090	24,8
2	13,5	4,20	28,7	28,7	28,7	4,96	-1780	372	727	13,0
3	13,5	4,20	27,3	27,3	27,2	4,89	1570	407	790	26,8
4	13,5	4,20	28,4	28,4	28,4	4,98	2890	379	727	25,7
5	13,5	4,20	28,2	28,2	28,2	4,98	-3,93	403	772	0,24063
6	13,5	4,20	27,1	27,0	27,0	4,78	-450	362	683	5,85
7	13,5	4,20	26,4	26,3	26,3	4,83	-2590	320	596	13,6
8	13,5	4,20	28,4	28,4	28,4	4,98	2520	379	710	26,0
9	13,5	4,20	26,9	26,9	26,9	4,87	-1250	397	741	10,9
10	13,5	4,20	26,8	26,8	26,8	4,98	2010	369	689	25,0
11	13,5	4,20	27,6	27,6	27,6	4,98	-1760	386	734	12,6
12	13,5	4,20	26,9	26,9	26,9	4,98	565	370	732	-----
13	13,5	4,20	26,0	25,6	25,6	4,35	521	1090	1120	-----
14	13,5	4,20	25,8	25,6	25,6	4,54	292	1080	1110	-----
Media	13,5	4,20	27,2	27,1	27,1	4,84	340	526	802	16,8
S.D.	0,00	0,00	0,98	1,05	1,05	0,20	1752,71	297,51	171,76	9,31

	Specimen behavior
1	Yield
2	Yield
3	Yield
4	Yield
5	Yield
6	Yield
7	Yield
8	Yield
9	Yield
10	Yield
11	Yield
12	Yield
13	Yield
14	Yield
Media	

PP95-RH5

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

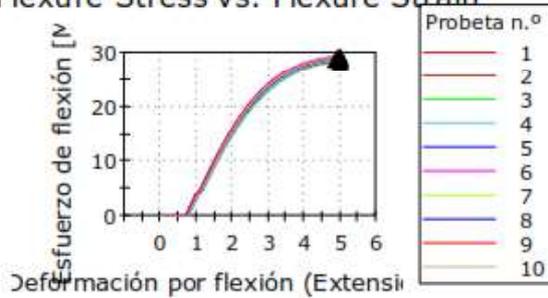


Tabla de resultados 1

	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	13,5	4,20	29,0	29,0	29,0	4,98	98,3	417	800	-----
2	13,5	4,20	28,4	28,4	28,4	4,93	-846	351	665	8,95
3	13,5	4,20	28,6	28,5	28,5	4,95	740	342	649	-----
4	13,5	4,20	28,5	28,4	28,4	4,82	845	321	604	-----
5	13,5	4,20	28,2	28,2	28,2	5,00	-2000,00	303	567	13,0
6	13,5	4,20	29,4	29,4	29,4	4,93	1250	416	793	29,3
7	13,5	4,20	28,0	28,0	28,0	4,95	-1240	332	617	10,7
8	13,5	4,20	28,8	28,7	28,7	4,98	-1020	393	740	10,1
9	13,5	4,20	29,1	29,1	29,1	4,89	2310	418	787	26,9
10	13,5	4,20	28,9	28,9	28,9	4,99	-2040	340	632	13,7
Media	13,5	4,20	28,7	28,7	28,7	4,94	-189	363	685	16,1
S.D.	0,00	0,00	0,43	0,43	0,43	0,05	1461,14	43,68	86,91	8,39

	Specimen behavior
1	Yield
2	Yield
3	Yield
4	Yield
5	Yield
6	Yield
7	Yield
8	Yield
9	Yield
10	Yield
Media	
S.D.	

PP92-RH5-MAPP

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

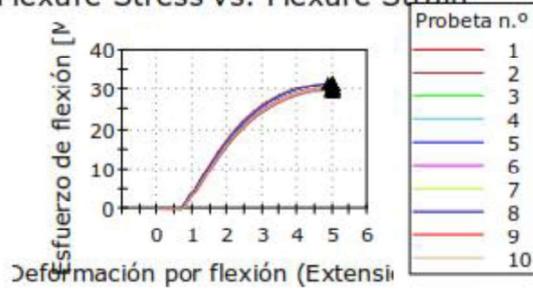


Tabla de resultados 1

	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	13,5	4,20	31,6	31,6	31,6	4,86	1260	438	857	31,6
2	13,5	4,20	30,8	30,8	30,8	4,99	-850	365	712	9,11
3	13,5	4,20	31,6	31,5	31,5	4,98	5300	367	714	25,7
4	13,5	4,20	29,7	29,7	29,7	5,00	-1530	415	810	12,5
5	13,5	4,20	31,5	31,5	31,5	5,00	-3150	414	799	16,7
6	13,5	4,20	30,4	30,4	30,4	5,00	382	361	694	-----
7	13,5	4,20	29,9	29,9	29,9	4,93	1360	376	721	29,7
8	13,5	4,20	31,6	31,5	31,5	4,98	1390	426	819	31,4
9	13,5	4,20	30,1	30,1	30,1	4,99	4720	410	784	24,4
10	13,5	4,20	30,5	30,5	30,5	5,00	-824	410	785	9,12
Media	13,5	4,20	30,8	30,8	30,7	4,97	805	398	769	21,1
S.D.	0,00	0,00	0,75	0,75	0,75	0,05	2646,25	28,06	55,26	9,37

	Specimen behavior
1	Yield
2	Yield
3	Yield
4	Yield
5	Yield
6	Yield
7	Yield
8	Yield
9	Yield
10	Yield
Media	
S.D.	

PP85-RH15

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

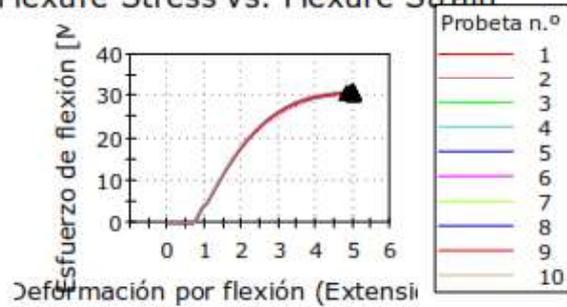


Tabla de resultados 1

	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	13,5	4,20	30,3	30,3	30,2	4,99	3980	401	791	26,4
2	13,5	4,20	30,4	30,4	30,4	4,99	1450	419	826	30,2
3	13,5	4,20	31,1	31,1	31,1	4,97	1110	401	788	-----
4	13,5	4,20	30,9	30,9	30,9	4,87	2660	458	901	28,8
5	13,5	4,20	30,8	30,8	30,8	4,97	801	404	793	-----
6	13,5	4,20	30,6	30,6	30,6	4,80	-2410	422	826	16,1
7	13,5	4,20	31,0	31,0	31,0	5,00	-2170	408	798	15,5
8	13,5	4,20	30,7	30,7	30,7	4,98	-862	405	791	9,61
9	13,5	4,20	30,7	30,6	30,6	4,79	772	404	792	-----
10	13,5	4,20	31,1	31,1	31,1	4,93	57,0	405	793	-----
Media	13,5	4,20	30,8	30,7	30,7	4,93	539	413	810	21,1
S.D.	0,00	0,00	0,27	0,28	0,28	0,08	1995,90	17,36	35,17	8,46

	Specimen behavior
1	Yield
2	Yield
3	Yield
4	Yield
5	Yield
6	Yield
7	Yield
8	Yield
9	Yield
10	Yield
Media	
S.D.	

PP82-RH15-MAPP

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

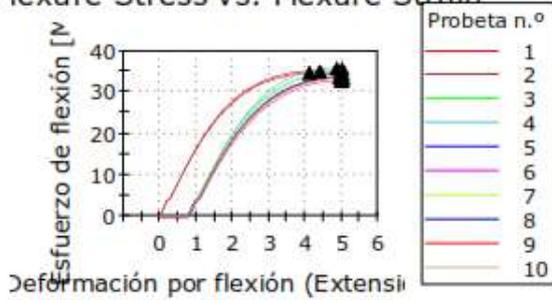


Tabla de resultados 1

	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	13,5	4,20	34,6	33,8	33,8	4,10	118	1610	1620	-----
2	13,5	4,20	35,0	34,5	34,5	4,39	3060	1640	1640	34,0
3	13,5	4,20	34,6	34,6	34,6	4,95	-888	405	802	10,1
4	13,5	4,20	35,8	35,7	35,7	4,86	-294	363	718	4,24
5	13,5	4,20	33,7	33,6	33,6	4,96	-764	373	733	8,80
6	13,5	4,20	32,7	32,7	32,7	4,97	-3190	382	749	17,2
7	13,5	4,20	33,2	33,2	33,2	4,99	3000	400	786	29,9
8	13,5	4,20	33,6	33,6	33,6	4,92	446	410	810	-----
9	13,5	4,20	33,5	33,5	33,5	4,99	1810	401	791	32,7
10	13,5	4,20	33,5	33,5	33,4	4,96	1080	400	789	-----
Media	13,5	4,20	34,0	33,9	33,9	4,81	438	638	944	19,6
S.D.	0,00	0,00	0,93	0,85	0,85	0,31	1905,75	519,95	364,33	12,5

	Specimen behavior
1	Yield
2	Yield
3	Yield
4	Yield
5	Yield
6	Yield
7	Yield
8	Yield
9	Yield
10	Yield
Media	
S.D.	

PP75-RH25

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

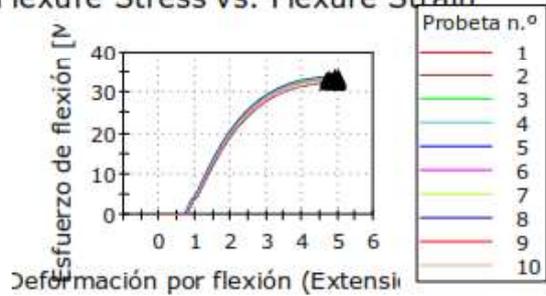


Tabla de resultados 1

	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	13,5	4,20	33,1	33,0	33,0	4,78	383	412	793	-----
2	13,5	4,20	33,7	33,7	33,7	4,90	-1900	412	787	15,8
3	13,5	4,20	33,4	33,3	33,3	4,74	799	469	903	-----
4	13,5	4,20	33,3	33,3	33,3	4,68	1380	448	861	33,3
5	13,5	4,20	34,0	33,9	33,9	4,91	-2610	486	940	18,4
6	13,5	4,20	33,1	33,0	33,0	4,90	-1070	411	789	11,5
7	13,5	4,20	33,1	32,9	32,9	4,83	-2350	416	800	17,1
8	13,5	4,20	32,5	32,5	32,5	4,86	-2150	410	790	16,0
9	13,5	4,20	32,4	32,3	32,3	4,67	279	409	787	-----
10	13,5	4,20	32,8	32,8	32,8	4,95	-910	417	805	10,1
Media	13,5	4,20	33,2	33,1	33,1	4,82	-815	429	825	17,4
S.D.	0,00	0,00	0,49	0,49	0,49	0,10	1438,44	28,14	55,66	7,58

	Specimen behavior
1	Yield
2	Yield
3	Yield
4	Yield
5	Yield
6	Yield
7	Yield
8	Yield
9	Yield
10	Yield
Media	
S.D.	

PP72-RH25-MAPP

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

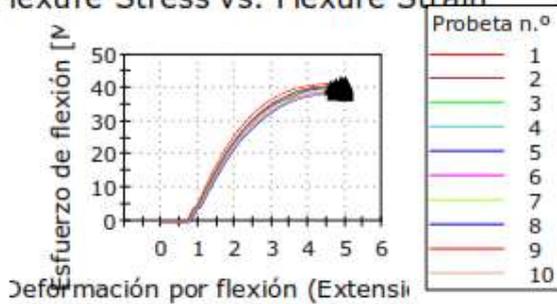


Tabla de resultados 1

	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	13,5	4,20	41,2	41,1	41,1	4,87	91,9	581	1140	-----
2	13,5	4,20	40,6	40,6	40,6	4,95	-4260	432	838	23,2
3	13,5	4,20	40,0	39,7	39,7	4,61	1660	439	853	39,8
4	13,5	4,20	39,8	39,6	39,6	4,76	1530	410	794	-----
5	13,5	4,20	39,8	39,6	39,6	4,89	297	526	1030	-----
6	13,5	4,20	39,0	38,6	38,6	4,69	927	407	795	-----
7	13,5	4,20	39,6	39,4	39,4	4,83	918	571	1120	-----
8	13,5	4,20	38,3	38,2	38,2	4,70	-1650	409	798	15,0
9	13,5	4,20	40,5	40,4	40,4	4,73	1250	501	985	-----
10	13,5	4,20	38,5	38,5	38,5	4,99	1080	404	790	-----
Media	13,5	4,20	39,7	39,6	39,6	4,80	184	468	914	26,0
S.D.	0,00	0,00	0,92	0,94	0,94	0,12	1830,71	70,52	140,81	12,6

	Specimen behavior
1	Yield
2	Yield
3	Yield
4	Yield
5	Yield
6	Yield
7	Yield
8	Yield
9	Yield
10	Yield
Media	
S.D.	

Anexo VIII. Ensayo de impacto (Resultados)

Condiciones

Id. Muestra	Fecha	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	Humedad inicial (% HR)	Humedad final (% HR)
Compuesto PP: 100% MI-IZOD-19-001 a la MI-IZOD-19-010	14/03/2019	22,0	22,1	48,3	48,0
Compuesto PP: 75%” – C.A.: 25% MI-IZOD-19-011 a la MI-IZOD-19-020	13/03/2019	21,1	21,4	57,2	56,2
Compuesto PP: 72%” – C.A.: 25% - MAPP: 3% MI-IZOD-19-021 a la MI-IZOD-19-030	13/03/2019	22,1	22,2	52,8	52,2
Compuesto PP: 82%” – C.A.: 15% - MAPP: 3% MI-IZOD-19-031 a la MI-IZOD-19-040	14/03/2019	22,4	22,5	52,6	51,9
Compuesto PP: 85%” – C.A.: 15% MI-IZOD-19-041 a la MI-IZOD-19-050	14/03/2019	22,4	22,3	49,5	49,5
Compuesto PP: 92%” – C.A.: 5% - MAPP: 3% MI-IZOD-19-051 a la MI-IZOD-19-060	14/03/2018	21,9	21,8	54,4	51,7
Compuesto PP: 95%” – C.A.: 5% MI-IZOD-19-061 a la MI-IZOD-19-070	14/03/2019	22,1	22,1	48,6	48,7

PP100

Compuesto PP:100%							
Muestra No.	Ancho (mm)	Profundidad (mm)	Tipo de probeta (ASTM D256-10)	Tipo de Falla	Energía de impacto (J)	Energía / longitud (J/m)	Energía / área (kJ/m ²)
1 MI-IZOD-19-001	6,70	13,48	E (sin muesca)	Rotura completa	4,4289	661,529	49,0931
2 MI-IZOD-19-002	6,68	13,40		Rotura completa	7,3405	1098,890	82,0373
3 MI-IZOD-19-003	6,68	13,39		Rotura completa	6,5025	974,1590	72,7528
4 MI-IZOD-19-004	6,69	13,39		Rotura completa	7,4817	1118,350	83,5214
5 MI-IZOD-19-005	6,69	13,47		Rotura completa	5,400	807,8340	59,9728
6 MI-IZOD-19-006	6,68	13,47		Rotura completa	7,6324	1143,440	84,9197
7 MI-IZOD-19-007	6,72	13,44		Rotura completa	6,1847	920,3520	68,4786
8 MI-IZOD-19-008	6,69	13,46		Rotura completa	5,3058	793,108	58,9452
9 MI-IZOD-19-009	6,67	13,44		Rotura completa	6,8881	1032,700	76,8669
10 MI-IZOD-19-010	6,65	13,40		Rotura completa	7,6362	1144,860	85,2152
Promedio				\bar{x}	6,480	969,522	72,180
Desviación estándar				S_{n-1}	1,126	169,454	12,698
Coeficiente de variación				CV	17,379	17,478	17,592

PP95-RH5

Compuesto PP: 95% – C.A.: 5%							
Muestra No.	Ancho (mm)	Profundidad (mm)	Tipo de probeta (ASTM D256-10)	Tipo de Falla	Energía de impacto (J)	Energía / longitud (J/m)	Energía / área (kJ/m ²)
1 MI-IZOD-19-061	6,65	13,50	E (sin muesca)	Rotura completa	1,9214	288,936	21,4106
2 MI-IZOD-19-062	6,63	13,45		Rotura completa	1,3851	209,082	15,5509
3 MI-IZOD-19-063	6,67	13,45		Rotura completa	1,6630	249,338	18,5450
4 MI-IZOD-19-064	6,68	13,47		Rotura completa	1,9677	294,791	21,8850
5 MI-IZOD-19-065	6,65	13,50		Rotura completa	1,6352	246,087	18,2354
6 MI-IZOD-19-066	6,68	13,41		Rotura completa	1,3885	208,021	15,5124
7 MI-IZOD-19-067	6,63	13,44		Rotura completa	1,6028	241,944	18,0017
8 MI-IZOD-19-068	6,64	13,48		Rotura completa	1,2769	192,457	14,2772
9 MI-IZOD-19-069	6,62	13,46		Rotura completa	1,7493	264,255	19,6399
10 MI-IZOD-19-070	6,70	13,47		Rotura completa	1,7599	262,673	19,5078
Promedio				\bar{x}	1,635	245,76	18,257
Desviación estándar				S_{n-1}	0,230	34,21	2,526
Coeficiente de variación				CV	14,046	13,92	13,836

PP92-RH5-MAPP

Compuesto PP:92% - C.A.: 5% - MAPP:3%							
Muestra No.	Ancho (mm)	Profundidad (mm)	Tipo de probeta (ASTM D256-10)	Tipo de Falla	Energía de impacto (J)	Energía / longitud (J/m)	Energía / área (kJ/m ²)
1 MI-IZOD-19-051	6,69	13,48	E (sin muesca)	Rotura completa	1,3627	203,694	15,1165
2 MI-IZOD-19-052	6,70	13,49		Rotura completa	1,6109	240,621	17,8436
3 MI-IZOD-19-053	6,73	13,48		Rotura completa	1,2902	191,858	14,2328
4 MI-IZOD-19-054	6,73	13,48		Rotura completa	1,5890	236,288	17,5288
5 MI-IZOD-19-055	6,61	13,37		Rotura completa	1,1781	178,371	13,3411
6 MI-IZOD-19-056	6,68	13,54		Rotura completa	1,5924	238,576	17,6201
7 MI-IZOD-19-057	6,68	13,46		Rotura completa	1,4302	214,274	15,9193
8 MI-IZOD-19-058	6,70	13,48		Rotura completa	1,4518	216,686	16,0746
9 MI-IZOD-19-059	6,66	13,44		Rotura completa	1,7763	266,915	19,8598
10 MI-IZOD-19-060	6,68	13,45		Rotura completa	1,4916	223,460	16,6203
Promedio				\bar{x}	1,477	221,07	16,416
Desviación estándar				S_{n-1}	0,174	25,97	1,912
Coeficiente de variación				CV	11,805	11,75	11,647

PP85-RH15

Compuesto PP:85% - C.A.: 15%							
Muestra No.	Ancho (mm)	Profundidad (mm)	Tipo de probeta (ASTM D256-10)	Tipo de Falla	Energía de impacto (J)	Energía / longitud (J/m)	Energía / área (kJ/m ²)
1 MI-IZOD-19-041	6,66	13,46	E (sin muesca)	Rotura completa	1,5602	234,450	17,4247
2 MI-IZOD-19-042	6,62	13,45		Rotura completa	1,2328	186,229	13,8512
3 MI-IZOD-19-043	6,66	13,38		Rotura completa	1,5556	233,584	17,4577
4 MI-IZOD-19-044	6,63	13,45		Rotura completa	0,9086	137,050	10,1934
5 MI-IZOD-19-045	6,66	13,44		Rotura completa	1,3998	210,338	15,6559
6 MI-IZOD-19-046	6,63	13,43		Rotura completa	1,0575	159,624	11,8901
7 MI-IZOD-19-047	6,62	13,43		Rotura completa	1,3280	200,613	14,9432
8 MI-IZOD-19-048	6,64	13,43		Rotura completa	1,1912	179,401	13,3632
9 MI-IZOD-19-049	6,65	13,42		Rotura completa	1,3761	206,944	15,4206
10 MI-IZOD-19-050	6,65	13,39		Rotura completa	1,4973	225,158	16,8216
Promedio				\bar{x}	1,311	197,34	14,702
Desviación estándar				S_{n-1}	0,215	32,04	2,398
Coeficiente de variación				CV	16,397	16,24	16,308

PP82-RH15-MAPP

Compuesto PP:82% - C.A.: 15% - MAPP: 3%							
Muestra No.	Ancho (mm)	Profundidad (mm)	Tipo de probeta (ASTM D256-10)	Tipo de Falla	Energía de impacto (J)	Energía / longitud (J/m)	Energía / área (kJ/m ²)
1 MI-IZOD-19-031	6,67	13,48	E (sin muesca)	Rotura completa	1,0532	157,909	11,7143
2 MI-IZOD-19-032	6,67	13,49		Rotura completa	1,1650	174,807	12,9582
3 MI-IZOD-19-033	6,66	13,48		Rotura completa	1,3537	203,266	15,0847
4 MI-IZOD-19-034	6,67	13,45		Rotura completa	1,5752	263,164	17,5587
5 MI-IZOD-19-035	6,68	13,47		Rotura completa	1,3773	206,183	15,3068
6 MI-IZOD-19-036	6,68	13,48		Rotura completa	1,5821	237,022	17,5898
7 MI-IZOD-19-037	6,67	13,43		Rotura completa	1,4257	213,756	15,9222
8 MI-IZOD-19-038	6,67	13,47		Rotura completa	1,0874	163,031	12,1077
9 MI-IZOD-19-039	6,67	13,49		Rotura completa	1,2570	188,465	13,9759
10 MI-IZOD-19-040	6,68	13,44		Rotura completa	1,1369	170,324	12,6729
Promedio				\bar{x}	1,301	197,79	14,489
Desviación estándar				S_{n-1}	0,192	33,89	2,145
Coeficiente de variación				CV	14,775	17,13	14,801

PP75-RH25

Compuesto PP:75% - C.A.: 25%							
Muestra No.	Ancho (mm)	Profundidad (mm)	Tipo de probeta (ASTM D256-10)	Tipo de Falla	Energía de impacto (J)	Energía / longitud (J/m)	Energía / área (kJ/m ²)
1 MI-IZOD-19-011	6,66	13,46	E (sin muesca)	Rotura completa	1,0767	161,669	12,0155
2 MI-IZOD-19-012	6,66	13,42		Rotura completa	1,165	175,069	13,0454
3 MI-IZOD-19-013	6,65	13,45		Rotura completa	0,7807	117,487	8,73836
4 MI-IZOD-19-014	6,66	13,45		Rotura completa	1,0511	157,827	11,7343
5 MI-IZOD-19-015	6,66	13,45		Rotura completa	0,9699	145,743	10,8399
6 MI-IZOD-19-016	6,65	13,45		Rotura completa	1,2350	185,859	13,8236
7 MI-IZOD-19-017	6,66	13,46		Rotura completa	1,1520	172,983	12,8516
8 MI-IZOD-19-018	6,66	13,46		Rotura completa	1,0809	162,433	12,0723
9 MI-IZOD-19-019	6,67	13,44		Rotura completa	1,0756	161,387	12,0080
10 MI-IZOD-19-020	6,66	13,45		Rotura completa	0,957	143,860	10,6999
Promedio				\bar{x}	1,054	158,43	11,783
Desviación estándar				S_{n-1}	0,128	19,22	1,431
Coeficiente de variación				CV	12,142	12,13	12,142

PP72-RH25-MAPP

Compuesto PP:72% - C.A.: 25% - MAPP: 3%							
Muestra No.	Ancho (mm)	Profundidad (mm)	Tipo de probeta (ASTM D256-10)	Tipo de Falla	Energía de impacto (J)	Energía / longitud (J/m)	Energía / área (kJ/m ²)
1 MI-IZOD-19-021	6,66	13,48	E (sin muesca)	Rotura completa	1,0906	163,758	12,1527
2 MI-IZOD-19-022	6,66	13,45		Rotura completa	0,9117	136,897	10,1782
3 MI-IZOD-19-023	6,68	13,44		Rotura completa	0,8614	128,961	9,59894
4 MI-IZOD-19-024	6,66	13,47		Rotura completa	0,8553	128,430	9,53459
5 MI-IZOD-19-025	6,65	13,49		Rotura completa	0,9699	145,962	10,824
6 MI-IZOD-19-026	6,66	13,48		Rotura completa	1,1585	174,091	12,9147
7 MI-IZOD-19-027	6,67	13,47		Rotura completa	0,8573	128,543	9,54297
8 MI-IZOD-19-028	6,67	13,48		Rotura completa	0,8962	134,476	9,97970
9 MI-IZOD-19-029	6,66	13,49		Rotura completa	1,2098	181,652	13,4657
10 MI-IZOD-19-030	6,69	13,45		Rotura completa	1,0056	150,427	11,1883
Promedio				\bar{x}	0,982	147,32	10,938
Desviación estándar				S_{n-1}	0,131	19,71	1,455
Coeficiente de variación				CV	13,325	13,38	13,302

Anexo IX. Ensayo de dureza (Resultados)

DUREZA SHORE D							
	PP100	PP95- RH5	PP92- RH5- MAPP	PP85- RH15	PP82- RH15- MAPP	PP75- RH25	PP72- RH25- MAPP
1	43	53	53	55	59	58	60
2	45	52	54	56	57	57	59
3	45	50	58	54	58	58	61
4	45	54	53	56	58	56	60
5	44	50	55	56	59	59	59
6	45	51	52	54	56	56	60
7	44	50	56	55	55	56	58
8	42	52	54	56	57	60	60
9	43	53	52	56	58	58	58
10	45	54	54	54	55	59	60
11	46	55	52	56	57	58	59
12	45	52	51	56	55	57	61
13	44	54	53	55	57	59	59
14	43	52	56	53	56	60	56
15	44	55	54	57	54	59	57
16	43	53	54	54	57	58	61
17	43	55	54	54	56	59	59
18	44	52	53	56	56	58	60
19	43	52	52	57	54	57	60
20	43	54	54	56	56	59	57
PROMEDIO	43,95	52,65	53,70	55,30	56,50	58,05	59,20
DESV. EST.	1,05	1,63	1,66	1,13	1,47	1,23	1,40

Anexo X. Densidad (Resultados)

Largo	128	cm
Ancho	13,5	cm
Espesor	4,2	cm
Volumen	7,26	cm ³

MASA [g]							
	PP100	PP92- RH5- MAPP	PP95-RH5	PP82- RH15- MAPP	PP85- RH15	PP72- RH25- MAPP	PP75- RH25
1	6,10	6,49	6,40	6,58	6,53	7,07	6,69
2	6,16	6,53	6,26	6,60	6,48	6,87	6,73
3	6,19	6,46	6,29	6,67	6,47	6,96	6,68
4	6,19	6,40	6,32	6,57	6,46	7,00	6,76
5	6,16	6,51	6,30	6,57	6,40	6,96	6,70
6	6,20	6,44	6,28	6,67	6,44	6,88	6,68
7	6,06	6,42	6,38	6,59	6,50	6,95	6,67
PROMEDIO	6,15	6,46	6,32	6,61	6,47	6,96	6,70
D.S.	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,07	0,03

DENSIDAD [g/cm ³]							
	PP100	PP92- RH5- MAPP	PP95-RH5	PP82- RH15- MAPP	PP85- RH15	PP72- RH25- MAPP	PP75- RH25
1	0,84	0,89	0,88	0,91	0,90	0,97	0,92
2	0,85	0,90	0,86	0,91	0,89	0,95	0,93
3	0,85	0,89	0,87	0,92	0,89	0,96	0,92
4	0,85	0,88	0,87	0,91	0,89	0,96	0,93
5	0,85	0,90	0,87	0,91	0,88	0,96	0,92
6	0,85	0,89	0,87	0,92	0,89	0,95	0,92
7	0,83	0,88	0,88	0,91	0,90	0,96	0,92
PROMEDIO	0,85	0,89	0,87	0,91	0,89	0,96	0,92
D.S.	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00