



Evaluación de las propiedades de mezclas binarias de polímeros mixtos posconsumo con polipropileno reciclado

Diana Lucia Pérez Jaramillo

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniera de Materiales

Asesora

Carmiña Gartner Vargas, Doctora en Ciencias Químicas

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería de Materiales
Medellín, Antioquia, Colombia
2024

Referencia

Estilo IEEE (2020)

- [1] D.L. Pérez Jaramillo, “Evaluación de las propiedades de mezclas binarias de polímeros mixtos posconsumo con polipropileno reciclado”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería de Materiales, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2024.



Centro de Investigación Ambientales y de Ingeniería (CIA).

Financiación del proyecto: Comité para el Desarrollo de la Investigación (CODI).



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI).

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano: Julio César Saldarriaga Bonilla.

Jefe departamento: Francisco Javier Herrera Builes

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Este proyecto está dedicado principalmente a Dios, por haberme dado la fortaleza para superar los obstáculos a lo largo de este ciclo académico; por permitirme valorar cada experiencia de aprendizaje, y por infundir en mí la determinación de nunca rendirme. También quiero reconocer a mi madre, cuyo amor incondicional se ha convertido en mi mayor apoyo y motivación para alcanzar cada una de mis metas; a mis hermanas y amigos por su constante apoyo, y finalmente al resto de mi familia por inculcarme los valores que pongo en práctica cada día.

Agradecimientos

Un agradecimiento muy especial para mi asesora Carmiña Gartner Vargas, quien con su apoyo y orientación ha sido fundamental en el desarrollo de este proyecto. También a la Universidad de Antioquia y todo su grupo de docentes, que formaron una profesional con los valores y cualidades necesarias para enfrentar los problemas de la vida diaria; al Centro de Investigación Ambientales y de Ingeniería (CIA) por creer en el proyecto y apoyarme con la financiación del mismo; y finalmente para industrias PLÁSTICOS AMBIENTALES S.A.S e IDEAS 3D, por permitirme conocer sus instalaciones y proveer la materia prima para llevarlo a cabo.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	13
ABSTRACT	14
I. INTRODUCCIÓN.....	15
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	19
III. JUSTIFICACIÓN	21
IV. OBJETIVOS.....	23
A. Objetivo general.....	23
B. Objetivos específicos	23
V. MARCO TEÓRICO.....	24
A. Materiales poliméricos y plásticos.....	24
1) Poliolefinas	25
a) Polipropileno (PP).....	25
b) Polietileno (PE).....	27
2) Ácido poli láctico (PLA)	29
a) El filamento PLA en la impresión 3D	30
B. Reciclaje de materiales poliméricos.....	31
1) Reciclaje mecánico.....	31
a) Reciclaje de poliolefinas.....	33
b) Reciclaje de PLA.....	34
C. Mezclas de polímeros.....	34
1) Miscibilidad y compatibilidad	35
a) Mezclas miscibles.	35
b) Mezclas inmiscibles.	36
c) Mezclas parcialmente miscibles.....	36

2) Poliolefinas mixtas recicladas (MPOr).....	37
VI. METODOLOGÍA	39
A. Descripción de materiales utilizados.	39
B. Elaboración de las mezclas.....	40
1) Formulación de mezclas	40
2) Procesamiento de las mezclas	41
C. Caracterización de las materias primas y de las mezclas	42
1) Ensayo de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).....	43
2) Ensayo de calorimetría diferencial de barrido (DSC)	43
3) Determinación del índice de fluidez (MFI)	45
4) Medidas de densidad relativa.....	46
5) Análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM)	47
D. Ensayo de tensión de la materia prima y de las mezclas.....	48
1) Inyección de Probetas.....	48
2) Ensayos de Tensión	51
VII. RESULTADOS Y ANALISIS	52
A. Resultados del procesamiento de extrusión de las mezclas.	52
B. Resultados y análisis de espectroscopia infrarroja por transformada de Furrier (FTIR) ...	53
1) Resultados y análisis por FTIR de la materia prima.	53
2) Análisis de resultados FTIR de las mezclas.....	59
C. Resultados de calorimetría diferencial de barrido (DSC).	63
1) Análisis de los resultados de DSC para las materias primas	65
2) Análisis de resultados de DSC para las mezclas.....	69
D. Resultados de las medidas de MFI	74
1) Resultados de las medidas de MFI de la materia prima	74

2) Análisis de resultados de MFI para las mezclas.....	77
E. Resultados de las medidas de densidad.....	78
1) Análisis de los valores de densidad de la materia prima	78
2) Análisis de los valores de densidad de las mezclas.....	79
F. Resultado de las medidas por SEM.....	82
1) Análisis SEM de la materia prima.....	82
2) Análisis de las micrografías SEM de las mezclas.....	83
G. Resultados del ensayo de tensión	89
1) Probetas de tensión utilizadas	89
2) Análisis del ensayo de tensión de la materia primas	90
3) Análisis del ensayo de tensión de las mezclas.	92
VIII. CONCLUSIONES	96
VIII. RECOMENDACIONES	98
REFERENCIAS	99

LISTA DE TABLAS

TABLA I EMPRESAS DEDICADAS AL SECTOR DEL RECICLAJE DE PLÁSTICOS [26]	22
TABLA II PROPIEDADES MECANICAS Y TERMICAS DE POLIPROPILENO COMERCIALES [32],[31].	27
TABLA III PROPIEDADES DE LOS PRINCIPALES TIPOS DE POLIETILENO [32][35].	28
TABLA IV PROPIEDADES DEL PLA UTILIZADO EN IMPRESIÓN 3D [39][40]	30
TABLA V RANGO DE DENSIDADES PARA POLÍMEROS TÍPICOS DE LOS DESECHOS PLÁSTICOS [44].	33
TABLA VI CONDICIONES DE PROCESO DE EXTRUSIÓN PARA LAS MEZCLAS DE PPr EN HDPEr Y LDPEr.	42
TABLA VII CONDICIONES DE PROCESO DE EXTRUSIÓN PARA LAS MEZCLAS DE PPr EN PLAr.	42
TABLA VIII CONDICIONES DE PROCESO DE INYECCIÓN PARA LAS MEZCLAS DE PPr EN HDPEr, LDPEr Y PLAr.	50
TABLA IX PERFILES DE TEMPERATURA.	50
TABLA X BANDAS DE ABSORCIÓN EN EL PPr.	54
TABLA XI TABLA BANDAS DE ABSORCIÓN EN EL HDPEr.	57
TABLA XII BANDAS DE ABSORCIÓN DEL LDPEr	57
TABLA XIII BANDAS DE ABSORCIÓN DEL PLAr.	58
TABLA XIV RESULTADOS DE ENSAYOS DSC PARA LA MATERIAS PRIMAS Y LAS RESPECTIVAS MEZCLAS.	64
TABLA XV PORCENTAJES DE PE Y PP EN LAS MEZCLAS.	65
TABLA XVI VALORES DE MFI DE LA MATERIA PRIMA Y DE MEZCLAS	74
TABLA XVII VALORES DE DENSIDAD DE LA MATERIA PRIMA Y DE LAS MEZCLAS	78
TABLA XVIII RESULTADOS DE ENSAYO DE TENSIÓN.	90

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Distribución de la producción mundial de plásticos en 2021.	16
Fig. 2. Distribución del uso de materiales en la fabricación aditiva.	17
Fig. 3. a) Unidad repetitiva del polipropileno. Isómeros del polipropileno: b) isotáctico, c) sindiotáctico y d) atáctico [32].	26
Fig. 4. a) Unidad repetitiva del PE. Representación de la microestructura de b) LDPE, c) HDPE y d) LLDPE[32].	28
Fig. 5. Unidad repetitiva del PLA [38].	29
Fig. 6. a) Ácido láctico. Isómeros b) L y c) D	30
Fig. 7. Sistema del reciclaje mecánico	32
Fig. 8. Esquema de la clasificación de mezclas de polímeros	35
Fig. 9. Esquemas de mezclas miscibles, parcialmente inmisible e inmisible.	37
Fig. 10. Patio de producción de bolsas de la empresa PLASTICOS AMBIENTALES S.A.S.	39
Fig. 11. Materias primas utilizadas. a) PPr, b) HDPEr, c) LDPEr, d) PLAr.	40
Fig. 12. Extrusora y peletizadoras utilizadas.	41
Fig. 13. Curvas de calibración para determinar PE/PP en las mezclas [54].	45
Fig. 14. Equipo utilizado para determinar en índice de fluidez.	46
Fig. 15. Balanza analítica y kit de densidad utilizados.	47
Fig. 16. Microscopio electrónico de Barrido[58].	47
Fig. 17. Muestras recubiertas en oro.	48
Fig. 18. Inyectora Welltec TTI-90SEII.	49
Fig. 19. Vista general del equipo.	49
Fig. 20. Probetas para flexión. Medición de ancho y espesor.	51
Fig. 21 Mezclas obtenidas por el proceso de extrusión.	52
Fig. 22. Espectro FTIR de PPr.	53
Fig. 23. Espectro FTIR de HDPEr	56
Fig. 24. Espectro FTIR de LDPEr	56
Fig. 25. Espectro FTIR de PLAr	58
Fig. 26. Espectros FTIR de las mezclas HDPEr- PPr.	60
Fig. 27 Espectros FTIR de las mezclas LDPEr- PPr	61
Fig. 28. Espectros FTIR de las mezclas PLAr - PPr	62

Fig. 29. Termogramas del PPr. a) Fusión, b) Cristalización.	66
Fig. 30. Termogramas del HDPEr. a) Fusión, b) Cristalización.	67
Fig. 31 Termogramas del LDPEr. a) Fusión, b) Cristalización.	68
Fig. 32. Termogramas del PLAr.....	69
Fig. 33. Termograma de las mezclas HDPEr-PPr. a) Fusión, b) Cristalización.	70
Fig. 34. Termograma de las mezclas LDPEr-PPr. a) Fusión, b) Cristalización.....	71
Fig. 35. Termograma de las mezclas PLAr-PPr. a) Fusión, b) Cristalización.	72
Fig. 36 Relación entre la cristalinidad. a) del PP y porcentaje de PP en la mezcla, b) del PE y porcentaje de PP en la mezcla, c) de la mezcla y porcentaje de PE en la mezcla.	73
Fig. 37 Apariencia de extruido para los materiales de partida. a) PPr, b) HDPEr y c) LDPEr. ...	75
Fig. 38 Relación entre el valor de MFI de la mezcla y porcentaje de PPr.....	77
Fig. 39 Relación entre el valor de la densidad y porcentaje de cristalinidad en la mezcla PPr-HDPEr	80
Fig. 40 Relación entre el valor de la densidad y porcentaje de cristalinidad en la mezcla PPr-LDPEr.....	81
Fig. 41. Imágenes SEM de la superficie de las materias primas. a) PPr, b) HDPEr, c) LDPEr, d) PLAr.	83
Fig. 42. Imágenes SEM de la superficie de las mezclas PPr-HDPEr.....	85
Fig. 43. Imágenes SEM de la superficie de las mezclas PPr-LDPEr.	86
Fig. 44. Imágenes SEM de la superficie de las mezclas PPr-PLAr.....	88
Fig. 45. probetas de tensión utilizadas.....	89
Fig. 46 Curvas esfuerzo-deformación de la materia prima.....	92
Fig. 47. Curvas esfuerzo-deformación. a) PPr-HDPEr, b) PPr-LDPEr, c) PPr-PLAr	93
Fig. 48. Relación entre la composición PPr y la resistencia la tensión, módulo de elasticidad (E). Mezclas a) PPr-HDPEr, b) PPr-LDPEr, c) PPr-PLAr.....	94

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

ABA	Acrilonitrilo Butadieno Acrilato
ABS	Acrilonitrilo butadieno estireno
AL	Ácido Láctico
D-	Dextrógiratoria
DSC	Calorimetría diferencial de barrido
DPP	Desechos plásticos posconsumo
EPDM	Monómero de etileno-propileno-dieno
EPS	Poliestireno expandido
FA	Fabricación aditiva
FTIR	Espectrometría infrarroja por transformada de Fourier
Gb_m	Energía libre de mezclado
H_m	Entalpia de mezclado
HDPE	Polietileno de alta densidad
HDPEr	Polietileno de alta densidad reciclado
IR	Espectrometría infrarroja
IUPAC	Unión Internacional de Química Pura y Aplicada
L-	Levógira
LDPE	Polietileno de baja densidad
LLDPE	Polietileno de baja densidad lineal
LDPEr	Polietileno de reciclado
MDPE	Polietileno de media densidad
MFI	Índice de fluidez
MPOr	Poliolefinas mixtas recicladas
Mt	Millones de toneladas
OF	Origen fósil
PB1	Poli buteno
PC	Policarbonato
PE	Polietileno puro
PET	Tereftalato de polietileno
PETG	PET con glicol

PLA	Ácido poli láctico
PLAr	Ácido poli láctico reciclado
PLDA	Ácido poli láctico del monómero D
PLLA	Ácido poli láctico del monómero L
PMP	Polimetilpenteno
PO	Poliiolefinas
POB	Plásticos de origen biológico
PP	Polipropileno puro
PPa	Polipropileno atáctico
PPB	Copolímero en bloque de propileno
PPH	Homopolímero de polipropileno
PPi	Polipropileno isotáctico
PPr	Polipropileno reciclado
PPs	Polipropileno sindiotáctico
PPAL	Copolímero de polipropileno de distribución Aleatorio
PPQ	Otros tipos de polipropileno
PR	Plástico reciclado
PS	Poliestireno
PUR	Poliuretano
PVC	Policloruro de vinilo
RPC	Reciclaje plástico posconsumo
RPI	Reciclaje postindustrial
RSM	Residuos sólidos municipales
RSP	Residuos sólidos plásticos
S_m	Entropía de mezclado
SEM	Microscopía electrónica de barrido
T	Temperatura de mezclado
Tgs	Temperatura de transición vítrea
TEOF	Termoestables de origen fósil
TOF	Termoplásticos de origen fósil
TPU	Poliuretanos termoplásticos

UHMWPE	Polietileno de peso molecular ultra alto
ULDPE	Polietileno de ultrajaba densidad
VLDPE	Polietileno de muy baja densidad

RESUMEN

Actualmente, es común el desarrollo de mezclas con poliolefinas recicladas en las industrias que procesan polímeros, debido a la dificultad de recolectar y clasificar una gran cantidad de estos materiales de la corriente de polímeros posconsumo por sus propiedades químicas y físicas similares. En ese sentido, resulta útil estudiar mezclas de poliolefinas mixtas recicladas (MPOr) para obtener información acerca de su comportamiento térmico, reológico y mecánico; y así determinar la miscibilidad y compatibilidad de las mezclas, lo que será de interés para desarrollar un procesamiento más eficiente que permita mejorar las propiedades, encontrar un valor comercial y facilitar el proceso de reciclaje. También se pretende con este estudio, encontrar una alternativa para los desechos de ácido poliláctico (PLA) en la impresión 3D, por su constante crecimiento en las últimas décadas. Por tal motivo, se realizaron mezclas entre MPOr y mezclas de MPOr con PLA a diferentes porcentajes en peso. Mediante el uso de la espectroscopía infrarroja (IR), calorimetría diferencial de barrido (DSC), microscopía electrónica de barrido (SEM), medidas del índice de fluidez (MFI) y pruebas de tracción, se realizó un análisis para caracterizar y determinar las propiedades de cada mezcla. Los resultados revelaron que, si bien muchas de las mezclas no eran completamente miscibles, las mezclas con 20 % de PPr exhibieron una miscibilidad parcial. Además, el incremento de PPr mejoró la resistencia a la tracción de las mezclas, y aquellas que contenían 60 % de PPr y 40% PPr-60% PLAr mostraron valores más elevados en el módulo de elasticidad.

Palabras clave —Mezclas de poliolefinas mixtas, miscibilidad, compatibilidad, reciclaje, PLA.

ABSTRACT

Nowadays, in polymer industries processing to mix post-consumer polyolefins due to the difficulty of separating and categorizing these materials from the post-consumer polymer stream given their similar chemical/physical properties. Therefore, researching combinations of post-consumer mixed polyolefins (MPOr) is critical for understanding their thermal, rheological and mechanical characteristics. This allows us to link these properties to the miscibility and compatibility of the blend, which can help enhance processing efficiency, improve material properties, discover applications and streamline the recycling process. The study also aims to discover an alternative, for polylactic acid (PLA) in 3D printing given its increase in prevalence over the past few decades. In this research, blends of MPOr and MPOr mixed with PLA at varying weight ratios were investigated. By incorporating infrared spectroscopy (IR), differential scanning calorimetry (DSC), scanning electron microscopy (SEM), melt flow index (MFI) and tensile tests, a comprehensive analysis was conducted to characterize the properties of each blend. The results revealed that while many of the blends were not fully miscible; blends containing 20% PPr, exhibited some degree of miscibility. Moreover, the inclusion of PPr in the blends enhanced tensile strength of the blends, and the blends containing 60% PPr and 40 % PPr-PLAr showing higher values in the modulus of elasticity.

Keywords — Blends mixed polyolefin, miscibility, compatibility, recycling, PLA.

I. INTRODUCCIÓN

Desde mediados del siglo XIX, la industria del plástico ha desempeñado un papel fundamental en el progreso de la sociedad debido a las características únicas de los materiales poliméricos. Estos materiales se destacan por su adaptabilidad y eficacia en una amplia gama de aplicaciones, lo que ha impulsado a su desarrollo constante. Sin embargo, el uso de estos materiales está asociado con consecuencias negativas para el medioambiente, debido a la existencia de polímeros con alta estabilidad física y química. Un ejemplo son las poliolefinas (PO), que poseen una alta inercia química y biológica, lo que les confiere ventajas en numerosas aplicaciones. Sin embargo, la gran estabilidad, resistencia a la degradación y uso generalizado junto con una eliminación inadecuada de estos materiales ha provocado la liberación de sustancias tóxicas al medioambiente, convirtiéndose así en uno de los mayores desafíos globales del siglo XXI [1],[2].

Uno de los principales factores que aumentan esa problemática ambiental es la producción y síntesis constante de estos materiales. Según las estadísticas y estimaciones actuales, la producción mundial de plástico alcanzó los 390,7 millones de toneladas (Mt) en 2021 y para el caso concreto de América Latina, se produjeron 15,6 Mt de plástico que representan el 4 % de la producción mundial en el mismo año. En Colombia se registraron 1.4 Mt en 2022, pero se espera que esta cifra se duplique en los próximos 20 años [3],[4],[5]. Así mismo, las PO son altamente demandadas y utilizadas, representando aproximadamente el 47% del total mundial de plásticos (**Fig.1**); especialmente el polietileno (PE) con el 27% y el polipropileno (PP) con el 19,3% , y presentan aplicaciones en embalajes, juguetes, electrodomésticos y productos desechables [4],[6],[7].

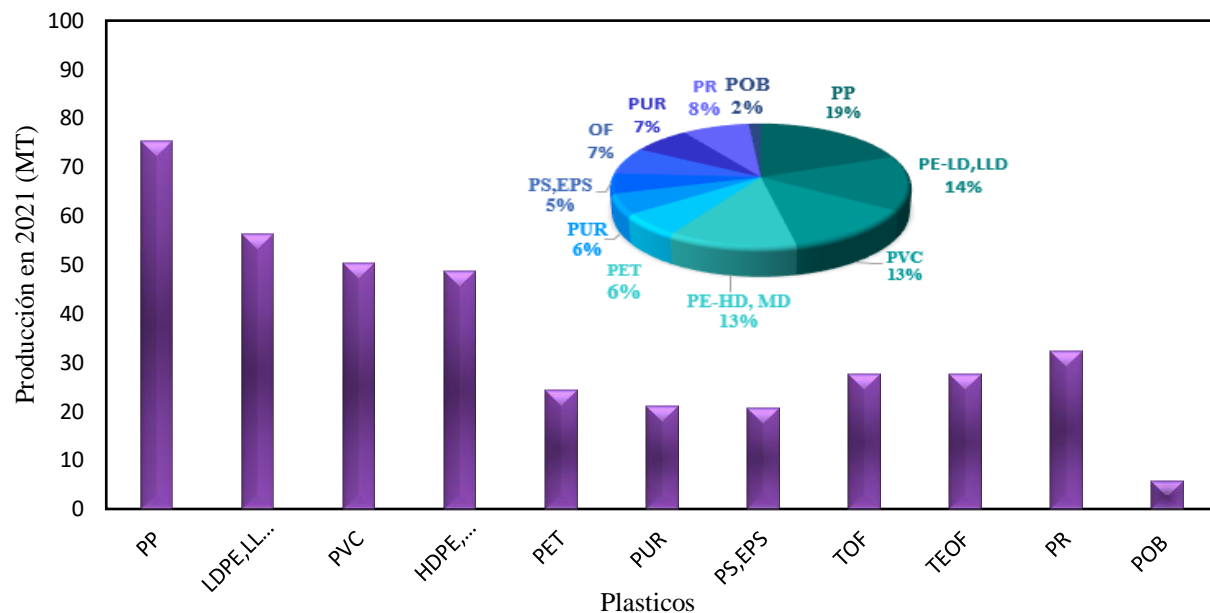


Fig. 1. Distribución de la producción mundial de plásticos en 2021.

Nota: Elaboración propia en base a revisión de literatura y bases de datos[6].

Al mismo tiempo, la fabricación aditiva (FA) conocida como impresión 3D, está emergiendo como una tecnología industrial y crucial para la creación rápida de prototipos; cuyo proceso consiste convertir un modelo digital 3D en piezas impresas por extrusión y deposición del material sobre una plataforma. Sin embargo, a pesar del gran auge de este procedimiento, entre el 5 y el 10 % de todos los productos de impresión 3D son desechados y terminan en vertederos [8]. Uno de los polímeros más utilizados en FA es el ácido poli láctico (PLA) (**Fig.2**), un poliéster alifático derivado de recursos 100% renovables, el cual es biocompatible y biodegradable bajo ciertas condiciones; no obstante, su uso masivo genera una gran acumulación de residuos a nivel mundial [9].

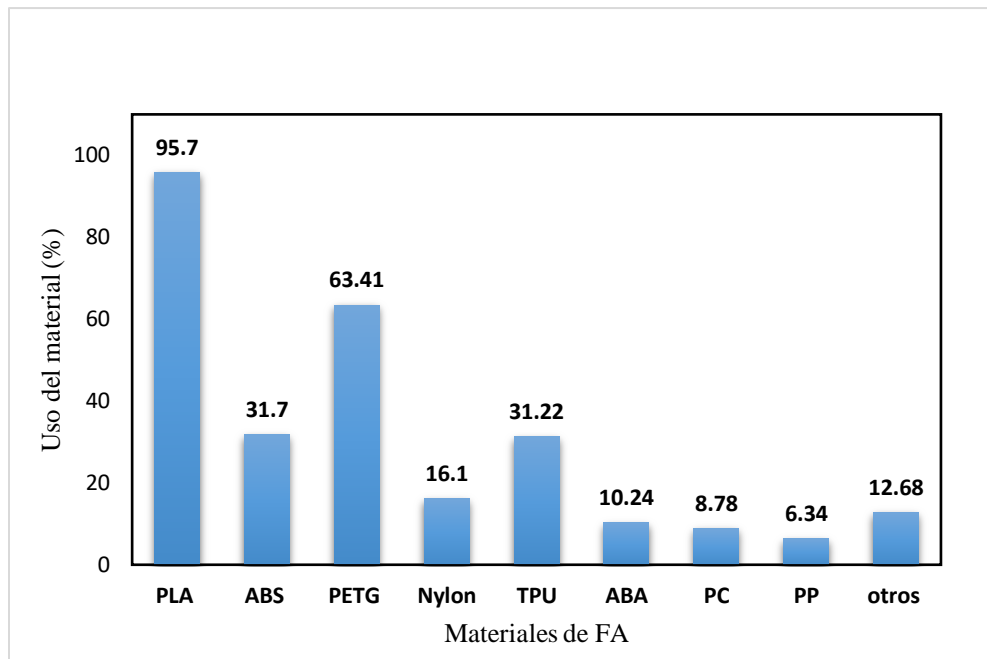


Fig. 2. Distribución del uso de materiales en la fabricación aditiva.

Nota: Elaboración propia en base a revisión de literatura y bases de datos [10].

En la actualidad, se logran avances significativos en la gestión de los residuos plásticos, además de un mayor desarrollo en el reciclaje mecánico y en el químico, y se han introducido nuevas tecnologías basadas en plásticos biodegradables [11],[12],[13]. Estas innovaciones contribuyen a reducir la cantidad de residuos plásticos generados cada año y disminuir la acumulación en vertederos o su eliminación mediante valorización energética. El reciclaje mecánico por su parte, sigue siendo uno de los métodos más utilizados para el reciclaje de plásticos, el cual consiste en obtener rápidamente un material que puede ser utilizado para fabricar el mismo producto o nuevos productos [14]. Sin embargo, este proceso presenta algunos desafíos, por ejemplo, la heterogeneidad de los polímeros y su degradación a causa del reprocesado; que afecta significativamente las propiedades de los polímeros, además la falta de infraestructuras adecuadas para clasificar y recolectar los materiales, así como la presencia de contaminantes en los distintos polímeros dificultan eficiencia de este proceso [15].

En relación con las PO, se suelen encontrar comúnmente en los residuos sólidos municipales (RSM), especialmente el PP y los diferentes tipos de PE (HDPE, MDPE, LDPE, LLDPE). Estos forman parte de la fracción ligera del flujo de residuos sólidos plásticos (RSP), que representa aproximadamente el 8% de la producción global de plásticos (**Fig.1**). Estos polímeros poseen una

densidad similar, lo que resulta en una separación no precisa, lo cual conlleva a una contaminación cruzada entre las poliolefinas recicladas. Por ejemplo, alrededor del 4% al 5% del PE se encuentra presente en el PP reciclado y del 8% al 10% del PP aparecen en el PE reciclado, también dado que ambos polímeros son inmiscibles entre sí, las mezclas resultantes tienen un rendimiento mecánico deficiente, incluso cuando están presentes en cantidades bajas [16],[17],[18],[19]. Esto limita su aplicabilidad en la industria. Sin embargo, estas mezclas conocidas como “poliolefinas mixtas recicladas” (MPOr) están ampliamente disponibles como recursos de materiales secundarios, suelen ser más económicas que las poliolefinas vírgenes y tienden a tener propiedades inferiores. A pesar de esto, su disponibilidad, precio y carácter sostenible hacen que sean interesantes para la industria del plástico. Para mejorar el rendimiento mecánico de mezclas de PE/PP reciclado, a menudo se utilizan agentes compatibilizantes, introduciendo principalmente un monómero de etileno-propileno-dieno (EPDM) o copolímeros de bloques de olefinas [20][21]. No obstante, el uso de compatibilizantes incrementa el costo de producción del polímero reciclado.

Con el objetivo de generar un método para aprovechar eficientemente las MPOr obtenidas del reciclaje mecánico, existe la necesidad de desarrollar un estudio sistemático que contribuya al mejoramiento de las propiedades de estos polímeros y hacerlos aptos en nuevas aplicaciones. Por lo tanto, este trabajo pretende analizar la compatibilidad de mezclas entre MPOr más comunes dentro de los RSP del reciclaje de polímeros, sin hacer uso de agentes compatibilizantes, con el fin de aportar información que pueda ser útil a sectores industriales específicos, además de facilitar el procesamiento de residuos sólidos plásticos con las tecnologías actuales del reciclaje mecánico. Simultáneamente también se pretende con esta investigación, observar la interacción entre el PLA de la industria FA y las MPOr con la finalidad de darle un uso a los desechos de la impresión 3D.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, las industrias del plástico han implementado estrategias que buscan valorizar los polímeros después de su uso y evitar su desecho en el medio ambiente con el fin de reducir la problemática ambiental asociada a estos materiales [21][22]. Una de estas estrategias es el uso de plásticos reciclados obtenidos a través del reciclaje mecánico, para convertirlos en nuevos productos. No obstante, esta estrategia plantea el desafío de utilizar mezclas entre polímeros posconsumo debido a la heterogeneidad de los RSP, los cuales contienen una combinación de varios productos, tipos y grados de plástico, con aditivos o residuos que son difíciles de separar. La problemática relacionada con el uso de estas mezclas radica en la baja compatibilidad, la presencia de contaminantes, la degradación térmica y la diversidad de propiedades en los polímeros, lo que generalmente conduce a un producto reciclado de menor calidad. Para abordar estas problemáticas es necesario avanzar en tecnologías de reciclaje, realizar una mayor investigación en la compatibilidad entre diferentes polímeros e implementar estándares y regulaciones que guíen el uso de polímeros reciclados en aplicaciones específicas.

Diversas investigaciones han demostrado que los RSP contienen principalmente polímeros como LDPE, HDPE e i-PP, seguidos de poliestireno (PS), cloruro de polivinilo (PVC) y tereftalato de polietileno (PET) [22]. El método más accesible y habitual para separar estos diversos plásticos es mediante el proceso de flotación, el cual se basa en la densidad de los materiales. En este método, los PP y PE, que tienen una densidad inferior a 1 g/cm³, se separan de los plásticos de mayor densidad, como el PET, PVC y PS. Sin embargo, uno de los mayores desafíos de este método es la posibilidad de separar de manera eficiente el PP y el PE, debido a sus densidades similares [23]. Además, el hecho de que existan diferentes fuentes de PP y PE reciclados implica la existencia de múltiples grados de estos materiales en el mercado, lo que añade complejidad a la composición de sus mezclas recicladas. Otro aspecto importante es que en el caso del reciclaje de polímeros posconsumo (RPC), las fuentes mixtas dan como resultado grandes volúmenes de grados de PP y PE, incluso alcanzando mezclas de aproximadamente 50/50 % en peso de PP y PE[14]. Teniendo en cuenta lo expuesto anterior, resulta importante llevar a cabo un exhaustivo análisis de las MPOr con el fin de comprender con mayor profundidad su estructura, propiedades, interacción y correlación, dado que hasta el momento se ha adquirido un amplio conocimiento científico

exclusivamente para sistemas ideales, como las películas de capas finas de PE y PP y mezclas que contienen componentes en estado virgen. No obstante, aún existe escasez en los fundamentos básicos sobre el comportamiento de las mezclas recicladas.

Por otro lado, el PLA es ampliamente utilizado en la impresión 3D por su capacidad para obtener modelos con alta resolución. A pesar de su eficacia, existe una falta de claridad en cuanto a la cantidad de residuos generados por esta tecnología. Según un informe de una consultora especializada en innovación en fabricación sostenible, se estima que alrededor del 33% de las impresiones 3D se convierten en residuos. Además, se prevé un aumento en la generación de desechos debido al constante crecimiento de esta industria. Esto plantea la necesidad de adoptar estrategias sostenibles que minimicen el impacto ambiental de la impresión 3D y fomenten la gestión adecuada de sus residuos [10]. Los residuos generados por la fabricación aditiva (FA) surgen principalmente a partir de impresiones fallidas y estructuras de soporte desechadas; además, es común que muchas piezas se produzcan como prototipos desechables. Dado que la tecnología de impresión 3D es rápida y económica, se realizan múltiples iteraciones que posteriormente, son descartadas. Por lo general, los residuos de la impresión 3D, como el PLA, se tratan principalmente mediante métodos de reciclaje físico, como la trituración y el reprocesamiento después de fusión a alta temperatura. Sin embargo, estos métodos suponen un desafío para lograr un reciclaje eficiente y ecológico. Además, de acuerdo con un artículo de la BBC del 2019 sobre el reciclaje de residuos de PLA, los bioplásticos derivados de fuentes vegetales, como el PLA, han evolucionado en términos de sus propiedades y aspectos, lo que dificulta su diferenciación de los plásticos convencionales y dificulta su reciclaje al tender a mezclarse con otros polímeros [24]. Por lo tanto, resulta sumamente interesante explorar alternativas de reciclaje para este material.

III. JUSTIFICACIÓN

El diseño de mezclas con MPOr permite obtener un nuevo material con propiedades que pueden ser ajustadas modificando algunas variables del proceso de mezclado, de tal modo que puedan cumplir con los requisitos exigidos por las industrias del plástico. Además, la fabricación de estas mezclas es más rápida, económica y simple que la síntesis de nuevos polímeros y permite la reducción de la cantidad de residuos en el planeta. A sí mismo, el estudio de estos materiales reciclados es de gran relevancia en el ámbito científico e ingenieril; ya que pueden responder a la gran demanda de productos poliméricos en la sociedad y facilitar el procesamiento de los polímeros posconsumo en el reciclaje mecánico.

Además, debido a que las MPOr se producen fácilmente en el reciclaje mecánico y con el hecho de que poseen diferentes propiedades físicas y químicas, se hace necesario realizar un estudio profundo sobre la interacción de estos materiales en mezclas, con el fin de evaluar sus propiedades y establecer un panorama para futuras aplicaciones. Asimismo, es importante destacar que el conocimiento sobre este tipo de mezclas aún es escaso, por lo que esta investigación ayuda a complementar los pocos estudios ya realizados.

Hoy en día, se utilizan diferentes tipos de agentes compatibilizantes o estrategias de compatibilización que ayudan a mejorar las propiedades de estos tipos de mezclas. Sin embargo, el presente proyecto se basa en mezclas recicladas tal y como se reciben después del proceso de separación mecánica, es decir, sin la inserción de ningún aditivo o compatibilizador. Así, se estudia la influencia de cada componente en las propiedades finales de las mezclas y se amplía el conocimiento científico adquirido en las últimas décadas sobre sistemas ideales, como por ejemplo de películas finas de PE y PP.

Un parámetro importante para esta investigación es la influencia de las proporciones de los polímeros en las mezclas sobre la compatibilidad, que permita asegurar una adecuada dispersión de los componentes de las mezclas y obtener materiales con propiedades finales adecuadas. El material de estudio en la investigación serán las MPOr, ya que las PO son los principales polímeros que generan un mayor volumen de residuos. Específicamente, el PE y el PP que es habitual

encontrarlos combinados en la corriente de RSP. Además, se utilizarán los residuos de filamentos de PLA de la fabricación aditiva debido al gran alcance de este mercado y la cantidad de residuos que produce. El eje central de este estudio es otorgar una referencia investigativa que facilite a las empresas dedicadas a la transformación de plásticos a procesar este tipo de materiales; en la **TABLA I** se reporta el total de empresas colombianas de este sector que pueden beneficiarse de esta investigación, principalmente para el procesamiento de los cuatro materiales seleccionados en este proyecto. Las MPOr elegidas para la investigación serán llamadas como PPr, LDPEr, HDPEr y los filamentos de PLA como PLAr.

TABLA I
EMPRESAS DEDICADAS AL SECTOR DEL RECICLAJE DE PLÁSTICOS [26]

	Total, de empresas en Colombia	Total, de empresas ubicadas en Medellín y el área Metropolitana	Porcentaje de empresas ubicadas en Medellín y el área Metropolitana
Empresas que recolectan, compran, seleccionan, clasifican, transportan, comercializan residuos termoplásticos	89	14	15,7%
Empresas que adquieren residuos plásticos seleccionados, prestan servicio a terceros o comercializan materia prima recuperada o producto terminado	29	7	24,2%
Empresas transformadoras de residuos termoplásticos	38	7	18,4%

IV. OBJETIVOS

A. *Objetivo general*

- Analizar el efecto de la composición en la miscibilidad y compatibilidad en mezclas binarias de polipropileno reciclado (PPr) con polietileno de baja densidad (LDPEr), polietileno de alta densidad (HDPEr) y ácido poli láctico (PLAr) posconsumo.

B. *Objetivos específicos*

- Realizar mezclas binarias en diferentes proporciones de PPr/LDPEr, PPr/HDPEr y PPr/PLAr.
- Determinar propiedades físico-químicas, morfológicas y reológicas de las mezclas obtenidas.
- Estudiar las propiedades mecánicas de aquellas mezclas que muestren mejor compatibilidad.

V. MARCO TEÓRICO

A. Materiales poliméricos y plásticos

Las palabras plásticos y polímeros, son utilizadas indistintamente y no tienen definiciones rígidas que sean universalmente aceptadas. Según la American Society for testing, en la norma ASTM D 883, un polímero es una sustancia que consiste en moléculas caracterizadas por la repetición de uno o más tipos de unidades químicas conocidas como monómeros [25]. Por su parte, un monómero es una molécula orgánica de bajo peso molecular y que se unen a otras para formar largas cadenas, generalmente mediante enlaces covalentes. Ahora bien, cada polímero presenta propiedades individuales según su composición, y estructura molecular, sin embargo, es posible distinguir varias propiedades químicas comunes entre ellos, por ejemplo, baja conductividad eléctrica y térmica, alta resistencia química y la capacidad de ser procesados fácilmente.

Por otro lado, para la American Society for Testing, un plástico se define como aquel material que posee como componente esencial una o más sustancias poliméricas orgánicas de gran peso molecular y son sólidos en su estado final; en algún momento durante su fabricación (fundido laminado, prensado, estiramiento, conformación, etc.) se han producido diversas formas de fluidización mediante la aplicación de calor o presión. Los plásticos son compuestos formados por moléculas que forman estructuras muy resistentes a las que se les puede dar forma mediante presión y calor [26].

Dentro de la clasificación de los polímeros por composición, se encuentran los polímeros orgánicos. Estos polímeros poseen en su cadena principal átomos de carbono y dentro de estos se encuentran los vinílicos que están constituidos únicamente por átomos de carbono [27][28]. Estos materiales también se pueden clasificar como termoplásticos o termoestables, según su comportamiento a la temperatura. Los termoplásticos fluyen al calentarlos y se endurecen al enfriarlos, mientras los termoestables no fluyen y lo único que se consigue al calentarlos es su degradación o descomposición química.

1) *Poliolefinas*

Las PO son un tipo de polímero vinílico, formado mediante la polimerización de monómeros olefínicos. Las olefinas, también conocido como “alquenos” por la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC), son un grupo de hidrocarburos que se producen a través de fuentes de carbono fósiles como el petróleo crudo y el gas. Estos polímeros constan únicamente de átomos de carbono e hidrógeno y se pueden unir ramas laterales a su cadena principal. Representan el tipo de termoplástico más importante y se utilizan en todo el mundo en diversas aplicaciones. El PP y PE son las poliolefinas más producidas cada año. El PP se utiliza, por ejemplo, en la producción de películas, baterías, piezas de automóviles y componentes eléctricos, y el PE se utiliza en artículos para el hogar, envoltorios, películas industriales, tuberías de gas, bolsas, juguetes, contenedores y envases de alimentos [29][30].

a) Polipropileno (PP)

El PP es uno de los polímeros más usados por la industria plástica desde que fue descubierto por el químico italiano Giulio Natta en 1954 y posteriormente producido por la empresa alemana Hoescht AG en 1957; a partir de ese momento ha estado en constante crecimiento debido a sus buenas propiedades. Este polímero se obtiene por polimerización en reacción de cadena y es un termoplástico semicristalino. Hace parte de los polímeros orgánicos vinílicos y en su cadena principal posee en uno de sus carbonos un grupo metilo (CH_3); su estructura corresponde a una cadena lineal de hidrocarburos saturados. Su característica principal corresponde a que, por cada dos átomos de carbono, se encuentra ramificado un grupo metilo. Estas características dan origen a tres formas isómeras de polipropileno que, dependiendo de la distribución de los metilos en el espacio, pueden resultar productos con diversas propiedades (**Fig. 3.**) [31].

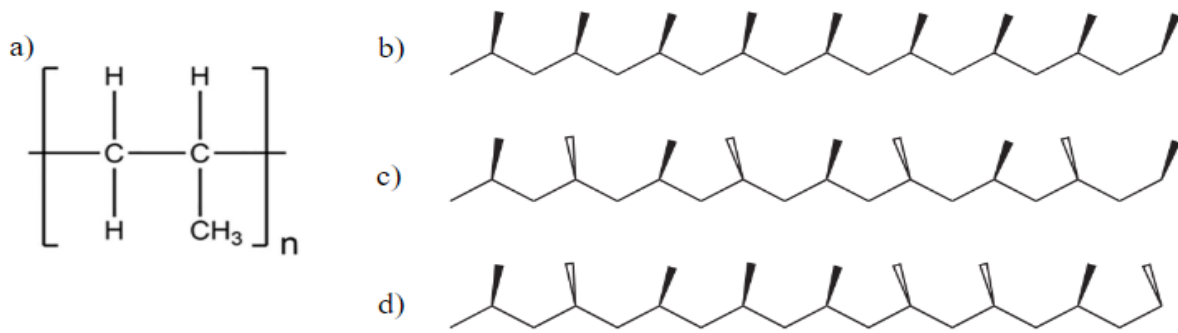


Fig. 3. a) Unidad repetitiva del polipropileno. Isómeros del polipropileno: b) isotáctico, c) sindiotáctico y d) atáctico [32].

En el polipropileno isotáctico todos los grupos metilo están ubicados en el mismo lado de la cadena, mientras que en el polipropileno sindiotáctico en lados alternos, y en polipropileno atáctico se disponen aleatoriamente a lo largo de la cadena. La irregularidad de la cadena en el polipropileno atáctico conduce a un material amorfo, mientras que los otros dos estereoisómeros dan lugar a cristales con diferentes puntos de fusión, alrededor de 165 y 130 °C para polipropileno isotáctico y sindiotáctico, respectivamente [31].

Según la norma DIN 16774 [33], el polipropileno también se puede clasificar con las siguientes descripciones:

- Homopolímero de polipropileno (PPH): Este polipropileno se obtiene mediante la polimerización del propileno puro.
- Copolímero en bloque de propileno (PPB): Posee un 50% en masa de olefinas alifáticas.
- Copolímero de polipropileno de distribución aleatoria (PPAL): Presenta más del 50% de masa de una o más olefinas alifáticas.
- Otro (PPQ): Es una mezcla de polipropilenos de hasta el 50% de todos los anteriores.

En la **TABLA II** se registran las propiedades de algunos polipropilenos comerciales [34].

TABLA II
PROPIEDADES MECANICAS Y TERMICAS DE POLIPROPILENO COMERCIALES [32],[31].

PROPIEDAD	HOMOPOLIMERO			COPOLIMERO	
Índice de fluidez	3	0,7	0,2	3	0,2
Resistencia a la tracción (Mpa)	34	30	29	29	25
Elongación a la rotura (%)	350	115	175	40	240
Temperatura de fragilidad (°C)	15	0	0	-15	-20

b) Polietileno (PE)

El polietileno posee la estructura química más simple entre los polímeros. Su estructura consiste en una unidad repetitiva basada en un monómero formado por dos metilenos ($\text{CH}_2\text{-CH}_2$) (**Fig.4.a**). Sin embargo, existe una variada de tipos PE debido a los procesos de polimerización que se desarrollaron históricamente. Estos tipos de PE se diferencian en masa molar, polidispersidad, propiedades mecánicas y variaciones en su estructura química. El primer PE se produjo en los años 30 mediante procesos de alta presión (1200-3000 bar), lo que dio lugar a materiales ramificados con bajo peso molecular (menos de 50 kg/mol), también conocidos como PE de baja densidad (LDPE) (**Fig.4. b**). Posteriormente, en los años 50 se logró un PE con una mayor densidad y cristalinidad debido al uso de mezclas binarias de halogenuros de metales de transición y alquilos metálicos (por ejemplo, $\text{TiCl}_4/\text{AlEt}_3$) que permitió la polimerización del etileno a presiones y temperaturas más bajas y dio lugar a un polietileno con una alta linealidad en sus cadenas y muy pocas ramificaciones, el cual se conoce como PE de alta densidad (HDPE) (**Fig.4.c**). Luego en los años 60, se inventó el PE de baja densidad lineal (LLDPE) mediante la copolimerización de etileno con olefinas como, por ejemplo, los Ziegler Natta. Su densidad y cristalinidad son similares al LDPE, pero no posee ramificaciones de cadena larga (**Fig.4.d**) [31].

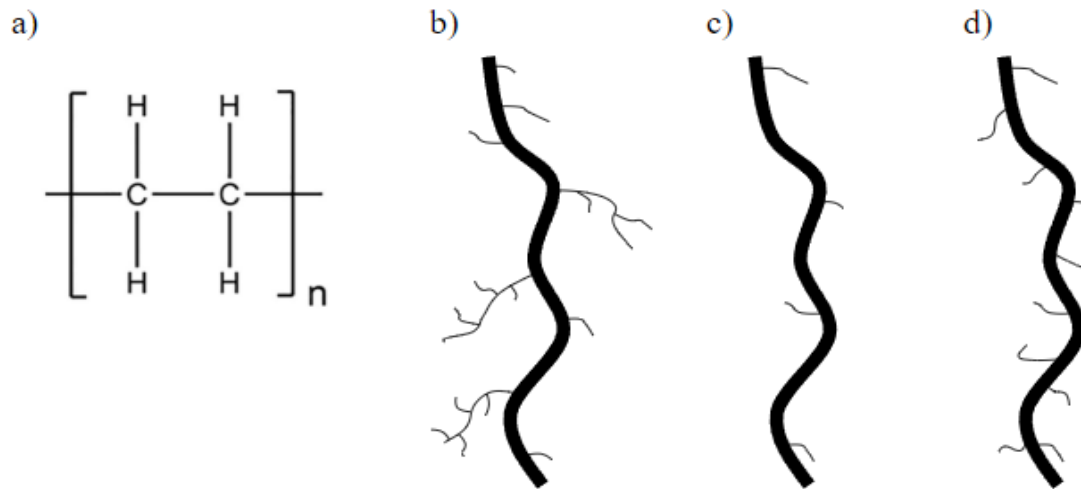


Fig. 4. a) Unidad repetitiva del PE. Representación de la microestructura de b) LDPE, c) HDPE y d) LLDPE[32].

Hoy en día, el LDPE, el HDPE y el LLDPE representan los tipos de PE más empleados, siendo el HDPE el más producido, seguido del LLDPE y el LDPE. Sin embargo, el tipo de polietileno lineal se ha ampliado cada vez más; por ejemplo, existen también PE de media densidad (MDPE), PE de muy baja densidad (VLDPE), PE de densidad ultrabaja (ULDPE) y PE de peso molecular ultra alto (UHMWPE).

En la **TABLA III** se registran las propiedades de los principales tipos de PE.

TABLA III
PROPIEDADES DE LOS PRINCIPALES TIPOS DE POLIETILENO [32][35].

PROPIEDAD	HDPE	MDPE	LDPE	LLDPE	VLDPE
Densidad ($\frac{g}{cm^3}$) [35]	0,941– 0,965	0,926– 0,940	0,915– 0,925	0,915– 0,925	0,870– 0,914
Índice de fluidez [35]	0,2–3,0	1–2,0	0,3–2,6	0,1–10,0	0,026 – 0,1
Módulo de elasticidad (Mpa)[32] [36]	900 -1200	400-900	250 -600	250 –700	200-400
Cristalinidad % [32] [36]	65–80	70-80	40-60	40-60
Punto de fluidez (C°)[32][36]	125–135	126 - 128 °C	106–120	120 –125	110 - 122 °C

2) *Ácido poli láctico (PLA)*

El PLA es un polímero de tipo poliéster alifático lineal, derivado de recursos renovables y es biodegradable. Proviene de la esterificación del ácido láctico (Al) producido por fermentación de una fuente de carbohidratos como el almidón de maíz. Este material es altamente permeable y rígido (**Fig.5**). Posee dos estereoisómeros, un isómero conocido como levógira (L) y otro como dextrógiro (D), que se diferencian en su efecto sobre la luz polarizada, donde el isómero L hace girar el plano de la luz polarizada en el sentido de las agujas del reloj y el isómero D lo hace en el sentido contrario a las agujas del reloj. También existe un meso isómero que es una combinación de L y D (**Fig.6**). Ahora bien, si el PLA consta enteramente del monómero L, entonces se llama PLLA, y si está compuesto del monómero D, se llama PLDA. Mediante estos dos isómeros se pueden formar diferentes tipos de PLA variando las proporciones de los respectivos isómeros. Las propiedades térmicas, mecánicas y la biodegradación dependen de la elección y distribución de los estereoisómeros dentro de las cadenas poliméricas. Por ejemplo, cuando el contenido de D es superior al 20%, entonces se puede obtener un polímero completamente amorfo, mientras que el PLA altamente cristalino solo se puede obtener cuando el contenido de L es superior al 90%. El PLA comercial es principalmente una mezcla de PLLA y PDLA [37].

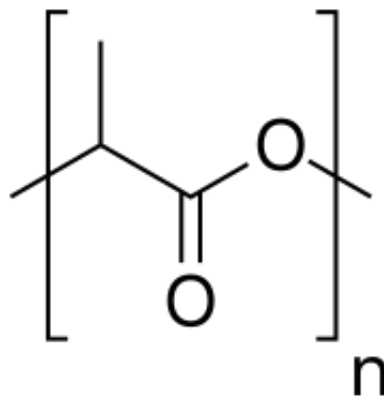


Fig. 5. Unidad repetitiva del PLA [38].

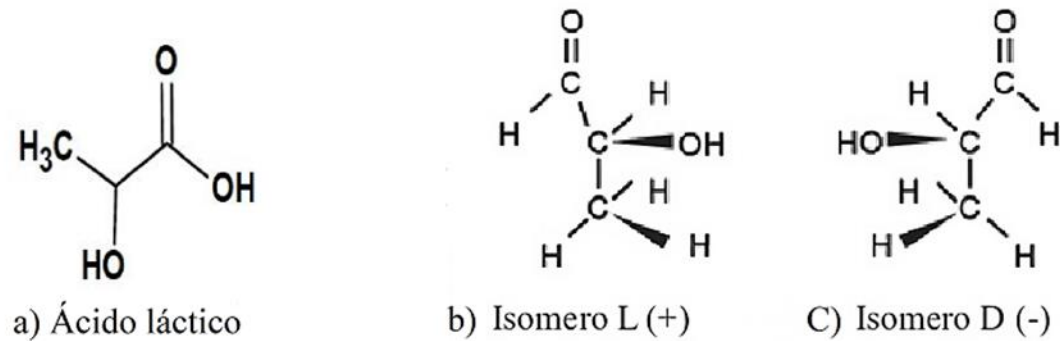


Fig. 6. a) Ácido láctico. Isómeros b) L y c) D

Nota: Elaboración propia en base a revisión de literatura y bases de datos[37].

a) *El filamento PLA en la impresión 3D*

En la actualidad, los filamentos de PLA son el material más utilizado en la industria en la FA debido a la facilidad de impresión, el brillo y la apariencia multicolor que ofrece en los productos impresos. La precisión de las partes dimensionales de los objetos de PLA es alta, ya que presenta un comportamiento de deformación menor que los otros filamentos. El filamento de PLA no tiene un postprocesamiento complejo, las piezas pueden ser lijadas y los soportes suelen retirarse muy fácilmente. En la **TABLA IV**, se pueden observar las propiedades de los filamentos de PLA en la impresión 3D.

TABLA IV
PROPIEDADES DEL PLA UTILIZADO EN IMPRESIÓN 3D [39][40]

Propiedades	Valores
Densidad (g/cc)	1.24
Temperatura de transición vítrea (T _g) (°C)	53–64
Temperatura de fusión cristalina (T _m) (°C)	145-186, 150-155
Temperatura de procesamiento de fusión (°C)	>185-190
Índice de flujo de fusión (g/10 min)	10–30
Resistencia a la tracción (MPa)	29,9–46,3
Resistencia máxima a la tracción (MPa)	51,7–60,4
Módulo de tracción (MPa)	1200–3000

B. Reciclaje de materiales poliméricos

El tipo de proceso de reciclaje determina en cierta medida las características (composición y propiedades) de los materiales que se obtienen tras la separación y tratamiento de los RSP. Existen cuatro procesos de reciclaje de plásticos: re-extrusión (primaria), mecánico (secundaria), químico (terciaria) y valorización energética (cuaternaria). En el proceso de re-extrusión, se utilizan piezas o residuos plásticos de grado industrial de un solo tipo de polímero para reintroducirlos a un nuevo ciclo de extrusión, en la misma línea de producción y así obtener un producto para la misma aplicación a la que estaba inicialmente destinado el material virgen. Se suelen utilizar residuos industriales (recortes, rebabas, etc.) sin contaminación y lotes defectuosos que suelen verse poco afectados por la degradación térmica durante el proceso. El reciclaje mecánico, por su parte, implica la separación física de los RSP, dando como resultado nuevos productos con propiedades diferentes a las originales.[39]. Por el contrario, los procesos de reciclaje químico producen materias primas para la industria química al convertir materiales plásticos en moléculas más pequeñas, generalmente líquidos o gases, mientras que la recuperación energética provoca la oxidación total o parcial de los materiales para producir energía en forma de calor, vapor o electricidad [40][41]. Es importante centrar esta investigación en las propiedades del PE, PP y PLA obtenidos a partir de la re-extrusión y el reciclaje mecánico, ya que, hasta el momento, estos procesos de reciclaje para estos materiales parecen ofrecer los resultados más prometedores económica y medioambientalmente.

1) Reciclaje mecánico

El reciclaje mecánico es un proceso físico que transforma los materiales post consumo en nuevas materias primas, las cuales pueden ser utilizadas gracias sus propiedades físicas y químicas similares al material virgen [31]. El reciclaje mecánico es aplicable a los diferentes plásticos denominados termoplásticos, los cuales son: PP, PS, PVC, HDPE, LDPE. Esta técnica se basa en las propiedades fisicoquímicas de los materiales plásticos. En la figura 7, se observa el sistema del reciclaje mecánico donde los materiales se encuentran sometidos a una serie de procesos físicos (molienda, trituración, lavado, fusión y pelletizado), los cuales modifican las propiedades de los

materiales, siendo mediocres en la práctica, lo que limita fuertemente su aplicabilidad y demanda del mercado (Fig. 7).

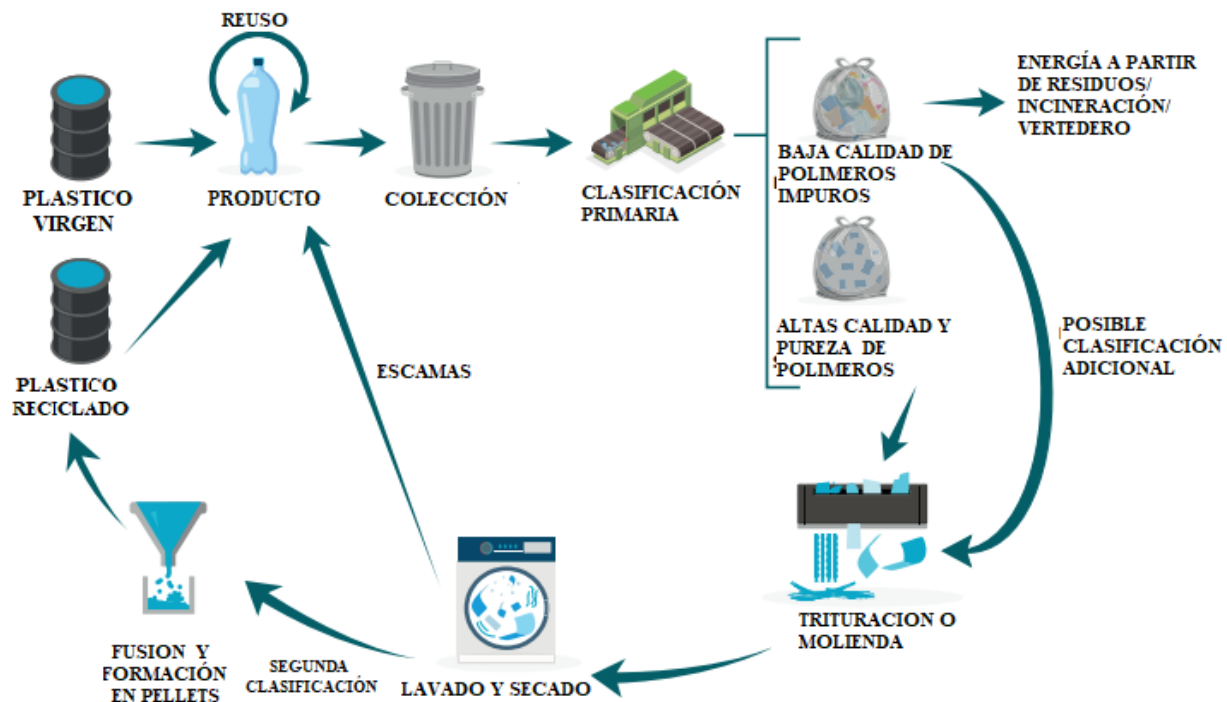


Fig. 7. Sistema del reciclaje mecánico

Nota: Adaptado y tomado de [42].

Existen dos factores que conducen principalmente al rendimiento insatisfactorio de los productos plásticos del reciclaje mecánico. El primero es la degradación de los residuos plásticos, debido a que están sometidos a altas temperaturas o cizallamiento durante su etapa de procesamiento, lo que produce una degradación termomecánica. Además, durante su vida, la exposición prolongada al aire, la luz, la humedad, la temperatura y la intemperie dan lugar a su envejecimiento natural. El segundo factor es la heterogeneidad de los residuos plásticos, debido a que son una mezcla de varios tipos de polímeros con distintos grados de polimerización y estructuras químicas, que son mutuamente incompatibles. Asimismo, los contaminantes, como restos de papel y aditivos adhesivos; deterioran las propiedades mecánicas de los polímeros reciclados y limitan sus aplicaciones. Cuanto más complejos y contaminados sean los residuos, más difícil será reciclarlos mecánicamente [43]. Las tecnologías complementarias como el reciclaje químico pueden abordar

esta situación; sin embargo, el primer paso debería ser repensar y rediseñar una opción más sostenible que se ajuste al sistema de reciclaje.

a) Reciclaje de poliolefinas

En el reciclaje mecánico se utiliza la técnica de flotación mediante tanques o hidrociclones para separar los distintos polímeros de los RSP, a través del valor de sus densidades. Esta técnica suele ser efectiva y recurrente; sin embargo, solo se logra identificar los polímeros con respecto al fluido utilizado (agua) pero no entre sí, es decir, grupos de polímeros que floten por igual o que se sumerjan a la misma distancia no pueden identificarse entre sí, y por lo tanto terminan mezclándose en los procesos de fusión. En la **TABLA V**, se puede apreciar que grupos de polímeros son fácilmente separables. En el caso del PP y del PE, son más complejos de distinguir dado a las similitudes entre sus densidades.

TABLA V
RANGO DE DENSIDADES PARA POLÍMEROS TÍPICOS DE LOS DESECHOS PLÁSTICOS [44].

Polímero	Densidad ($\frac{g}{cm^3}$)	Comportamiento en el proceso de flotación en agua
PP	0,9 – 0,92	Flota
LDPE	0,91 – 0,93	Flota
HDPE	0,94 – 0,96	Flota
PS	1,03 – 1,06	Variable
PET	1,30 – 1,38	Se hunde
PVC	1,32 – 1,45	Se hunde

En la actualidad, los procesos de reciclaje tienen en cuenta lo explicado anteriormente, y han buscado la forma más eficiente de lograr una separación adecuada entre los distintos polímeros. Sin embargo, aún se reportan en bibliografía mezclas LDPE/ PP en distintas proporciones en su composición. Por lo tanto, resulta de interés estudiar en profundidad este tipo de mezclas que permitan aprovecharlas para usarse como materia prima secundaria [41].

b) Reciclaje de PLA

Debido a la gran cantidad de desechos que genera la impresión 3D, se ha empezado a cuestionar sobre la sostenibilidad del filamento de PLA. Ya que, aunque se sabe que proviene de materiales vegetales como el almidón de maíz y la caña de azúcar, es biodegradable y su reciclaje no es sencillo. Hoy en día, los bioplásticos de origen vegetal, como el PLA, presentan características similares a los plásticos tradicionales, lo que resulta en un desafío diferenciarlos y reciclarlos [24]. Este polímero por ser biodegradable, permite varios métodos de gestión de residuos, incluido el compostaje, la combustión, el reciclaje mecánico y el derramado en vertederos.

Sin embargo, el compostaje no es tan realista debido a las condiciones extremas y al tiempo necesario para lograr una degradación total. El hecho de ser biodegradable, hace referencia a una descomposición bajo ciertas condiciones aeróbicas, es decir, el PLA puede degradarse rápidamente al someterlo a procesos de compostaje industrial, de no ser así puede tardar hasta 80 años en su descomposición en el medio ambiental, convirtiéndose así en un contaminante plástico más. Por otro lado, la eficiencia ambiental de la combustión está limitada por la producción de dióxido de carbono.

Recientes trabajos reportan que el impacto ambiental del reciclaje mecánico para el PLA es 50 veces mejor que el compostaje y 16 veces mejor que la combustión [44]. El impacto ambiental del PLA reciclado es menor al de los plásticos a base de petróleo, por provenir de recursos vegetales.

C. Mezclas de polímeros

Las mezclas de los polímeros son una alternativa en el desarrollo de materiales poliméricos; ya que estas permiten modificar y adaptar las propiedades en aplicaciones particulares. Estas mezclas tienen gran importancia tecnológica e ingenieril, se ha estimado que más del 30% de todos los polímeros se venden en forma mixta. Además, su costo en investigación y desarrollo resulta ser más atractivo que aquel asociado a las opciones de síntesis y modificación química [45][46].

La mezcla de polímeros se entiende como todo material constituido por dos o más polímeros cuyas interacciones entre sí son físicas. Estas mezclas se clasifican como miscibles, parcialmente miscibles e inmiscibles, y estas últimas se pueden dividir en compatibles e incompatibles [47] (**Fig.8**).

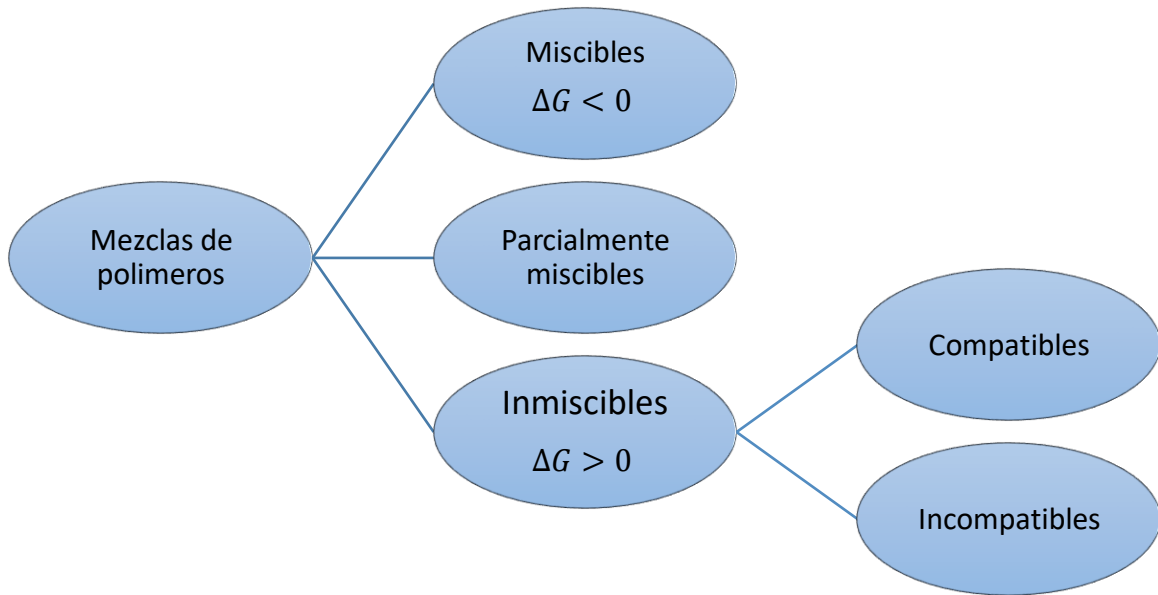


Fig. 8. Esquema de la clasificación de mezclas de polímeros

1) Miscibilidad y compatibilidad

a) Mezclas miscibles.

En términos estrictamente termodinámicos, la miscibilidad en mezclas se refiere a la existencia de una única fase a nivel molecular. Este fenómeno implica que los componentes de la mezcla se encuentran distribuidos de manera homogénea, lo que da como resultado una solución completamente uniforme (**Fig.9**)[48]. Una característica de este tipo de mezclas es que presentan una sola temperatura de transición vítrea (T_g).

b) Mezclas inmiscibles.

En una mezcla inmisible, existe una fase heterogénea donde los dos materiales no se disuelven entre sí y forman la interfaz entre los componentes [48] (**Fig. 9**). Una propiedad inusual de las mezclas inmiscibles es presentar dos Tgs. Dado que los dos componentes están separados en fases, conservan sus Tgs separadas.

- Mezclas compatibles: Esta clasificación se basa en criterios funcionales, es decir, una mezcla es compatible cuando, aun siendo inmisible, tiene propiedades útiles en alguna aplicación, además es estable en el tiempo.
- Mezclas incompatibles: son aquellas que poseen propiedades deficientes en determinada aplicación y no es posible utilizarla.

c) Mezclas parcialmente miscibles

Las mezclas parcialmente inmiscibles son aquellas en las que se forman más de una fase, pero cada fase constituida por ambos polímeros es homogénea hasta nivel microscópico [46]. En estas mezclas un componente se disuelve parcialmente en el otro, formando una fase heterogénea. La mezcla parcialmente miscible también se denomina material heterogéneo isotrópico en el que la composición de la fase separada es diferente a la de los componentes puros antes de la mezcla (**Fig.9**) [48].

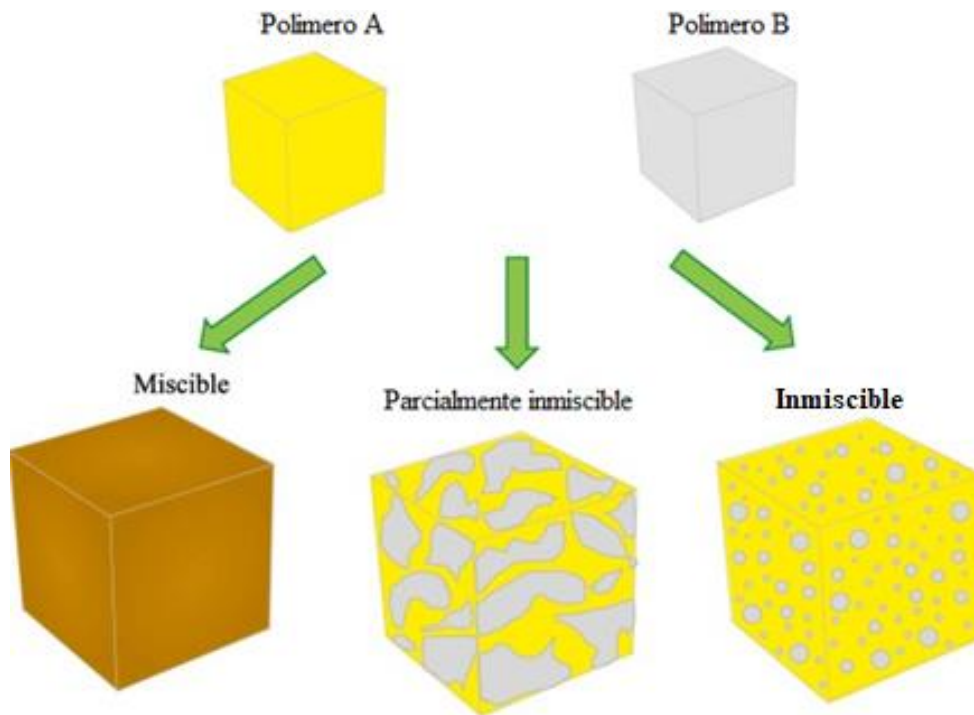


Fig. 9. Esquemas de mezclas miscibles, parcialmente inmiscible e inmiscible.

Nota: Adaptado y tomado de [48].

2) *Poliiolefinas mixtas recicladas (MPOr)*

Las mezclas de poliolefinas recicladas son aquellas que se componen por poliolefinas posconsumo, principalmente de PP y PE en distintas proporciones, además de contener aditivos e impurezas relacionadas con los polímeros reciclados. Este tipo de mezclas son obtenidas mediante el proceso de reciclaje mecánico, debido a la dificultad que existe al separar los distintos polímeros en los RSP, especialmente el PP y el PE, a causa de sus características similares. Según estudios preliminares, este tipo de mezclas son comúnmente utilizadas como materia prima secundaria por algunas industrias de los plásticos, por su carácter económico y ecológico. Sin embargo, su uso es limitado debido a sus propiedades mecánicas deficientes, dado que las mezclas resultan no ser miscibles.

Las características como la morfología y la historia térmica, determina las propiedades mecánicas de este tipo de mezclas. Generalmente, presentan propiedades más bajas en comparación con las

mezclas vírgenes dado a la degradación termo-oxidativa irreversible durante los procesos sucesivos en el reciclaje mecánico. A pesar de los desafíos que presentan este tipo de mezclas, sus estudios siguen en constante crecimiento debido a que es una de las opciones más económicas y eficiente del reciclaje de poliolefinas [49].

VI. METODOLOGÍA

A. Descripción de materiales utilizados.

Para las mezclas binarias de materiales reciclados se utilizó MPOr y PLAr. Las MPOr fueron suministradas por la empresa PLASTICOS AMBIENTALES S.A.S ubicada en el municipio de Sabaneta, Antioquia. Esta empresa se encarga de recolectar plásticos flexibles como el PP y el PE de los RSP, para posteriormente realizarles un proceso de transformación y reincorporarlos en forma de empaques a la cadena productiva. Su mayor distribución son bolsas plásticas para cadenas de supermercados, en la figura 10 se puede visualizar parte de las instalaciones de la empresa (**Fig.10**). Los materiales provistos fueron polipropileno reciclado (PPr) y dos tipos de polietilenos reciclados (HDPEr y LDPEr). Además, los residuos de impresiones 3D de PLA (PLAr) fueron proporcionados por 3D Diseños, Ideas 3D y Universo 3D; los cuales son emprendimientos especializados en la industria de las impresiones 3D en la ciudad de Medellín. En la figura 11, se puede visualizar las materias primas utilizadas (**Fig. 11**).



Fig. 10. Patio de producción de bolsas de la empresa PLASTICOS AMBIENTALES S.A.S.

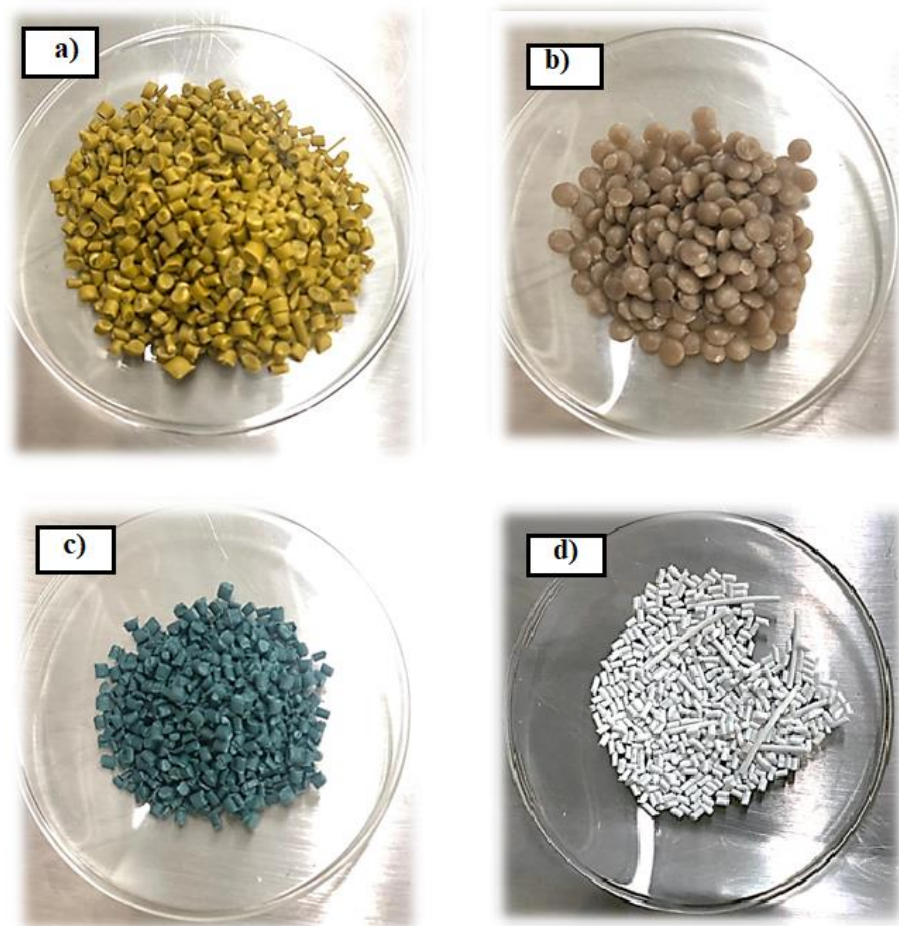


Fig. 11. Materias primas utilizadas. a) PPr, b) HDPEr, c) LDPEr, d) PLAr.

B. *Elaboración de las mezclas.*

1) *Formulación de mezclas*

Se llevaron a cabo mezclas de PPr en LDPEr, HDPEr y PLAr en proporciones de 20, 40, 60 y 80 % en peso. Esta selección de formulaciones fue elegida debido a su amplio rango de composiciones. Se optó por utilizar PPr como componente principal debido a la información proporcionada por PLASTICOS AMBIENTALES S.A.S, donde se indica que es el polímero más económico y ampliamente disponible.

2) *Procesamiento de las mezclas*

La elaboración de las mezclas se llevó a cabo utilizando una extrusora de doble husillo de la marca EVERPLAST, específicamente el modelo TE 35 de doble estación, tipo corte cadena con línea para peletizado. Dicha extrusora se encuentra instalada en el laboratorio de pruebas de calzado y polímeros avanzado, perteneciente al Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) (**Fig 12**). Las condiciones óptimas para la extrusión fueron seleccionadas teniendo en cuenta los datos de Índice de Fluidez Melt (MFI) de cada una de las materias primas, así como la experiencia previa del operario este tipo de procesos. Estas condiciones se resumen en la **TABLA VI y VII**. Se extruyeron 600 gramos de cada mezcla, de los cuales se destinaron 400 gramos para inyección.



Fig. 12. Extrusora y peletizadoras utilizadas.

TABLA VI

CONDICIONES DE PROCESO DE EXTRUSIÓN PARA LAS MEZCLAS DE PPr EN HDPEr Y LDPEr.

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7
Perfil de temperatura (°C)	210	210	220	220	230	235	240
Velocidad Alimentador (Hz)				N/A			
Velocidad Tornillo (rpm)				55.3			
Velocidad Cortadora (rpm)				188-230			
Temperatura del Cabezal (C°)				240			
Corriente en máquina (A)				28			
Tiempo de residencia (s)				N/A			
Producción (g/h)				600			

TABLA VII

CONDICIONES DE PROCESO DE EXTRUSIÓN PARA LAS MEZCLAS DE PPr EN PLAr.

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7
Perfil de temperatura (°C)	210	210	220	220	230	235	240
Velocidad Alimentador (Hz)				N/A			
Velocidad Tornillo (rpm)				55.3			
Velocidad Cortadora (rpm)	80% PPr		60% PPr		40% PPr		20% PPr
	130-190		150-113		120-95		N/A
Temperatura del Cabezal (C°)				240			
Corriente en máquina (A)				28			
Tiempo de residencia (s)				N/A			
Producción (g/h)				600			

C. Caracterización de las materias primas y de las mezclas

Cada uno de los materiales de partida fue sometido a una caracterización inicial para determinar su composición y el comportamiento térmico, lo cual resultó de suma importancia antes de realizar las mezclas. Tanto las materias primas como las mezclas fueron caracterizadas mediante espectroscopia infrarroja de transformada de Fourier (FTIR), calorimetría diferencial de barrido (DSC), índice de fluidez (MFI), densidad relativa y microscopía electrónica de barrido (SEM).

Estos ensayos permitieron obtener datos precisos y detallados sobre las propiedades físicas y químicas de los materiales, lo que resultó fundamental para el desarrollo y la comprensión de los procesos involucrados en el estudio.

1) Ensayo de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

Se llevó a cabo un análisis de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) con el propósito de identificar los grupos funcionales presentes en cada una de las materias primas. Esta técnica es de suma importancia en el ámbito de esta investigación, ya que permitió determinar la composición de cada uno de los materiales de origen y de las correspondientes mezclas. Asimismo, fue posible detectar señales de degradación en los materiales, lo cual puede influir en las propiedades mecánicas de los mismos.

Este estudio fue realizado utilizando un espectrofotómetro Perkin-Elmer Spectrum Two equipado con un accesorio de reflectancia total atenuada (ATR) Smart Orbit. Los espectros fueron registrados en el rango de 4000 a 500 cm^{-1} y se promediaron 84 escaneos con una resolución de 4 cm^{-1} . Este instrumento se encuentra ubicado en el laboratorio de Química de Polímeros de la Universidad de Antioquia.

2) Ensayo de calorimetría diferencial de barrido (DSC)

La fusión y cristalización de las materias primas y las mezclas fueron medidas por DSC usando un equipo de la marca TA Instruments, modelo Q100. Los datos se registraron en un intervalo de temperatura entre 25 y 200°C, en atmósfera de nitrógeno, usando alrededor de 10 mg de cada muestra en cápsulas de aluminio herméticas. Se hizo un ciclo de calentamiento inicial hasta 200°C para eliminar la historia térmica, luego un enfriamiento y nuevo calentamiento para obtener las curvas de cristalización y fusión respectivamente. La velocidad de calentamiento o enfriamiento fue de 10°C min^{-1} . Esta técnica es fundamental para el desarrollo de esta investigación, ya que permite confirmar la composición de las materias primas y las mezclas examinadas mediante el uso de la técnica FTIR. Su aporte más destacado radica en la capacidad de establecer la miscibilidad

de las diferentes mezclas, mostrando entalpías de fusión por separado de los respectivos componentes, además ayuda a determinar la cristalinidad lo cual posee influencia en las propiedades mecánicas del material.

Los porcentajes de cristalinidad de las muestras fueron determinados usando la ecuación (1). En donde se relaciona el cambio de la entalpía de fusión de cada componente de la mezcla, con el cambio de entalpía de fusión de los componentes con un porcentaje de cristalinidad del 100 % [50].

$$\% \text{ Cristalinidad} = \left(\frac{\Delta H_m}{H_m^\circ} \right) \cdot 100\% \quad (1)$$

Donde: ΔH_m es la entalpía de fusión del componente en la mezcla y H_m° entalpía de fusión del componente 100 % cristalino. Se utilizó $H_m^\circ = 209 \text{ J/g}$ y $H_m^\circ = 293 \text{ J/g}$ como valores teóricos para el PP y el PE respectivamente[51].

Para determinar la proporción de cada componente en la mezcla, se utilizaron las curvas de calibración desarrolladas previamente por Erdal Karaagac, Mitchell Jones, Thomas Koch y Maria Archodoulaki. Estas curvas de calibración se obtuvieron a partir de una serie de mezclas de PP-HDPE y MPOr, con el propósito de determinar la contaminación de PP en las MPOr. Este estudio se considera un complemento importante para el presente proyecto [52]. Las curvas de calibración mencionadas se muestran en las siguientes figuras (**Fig.13**).

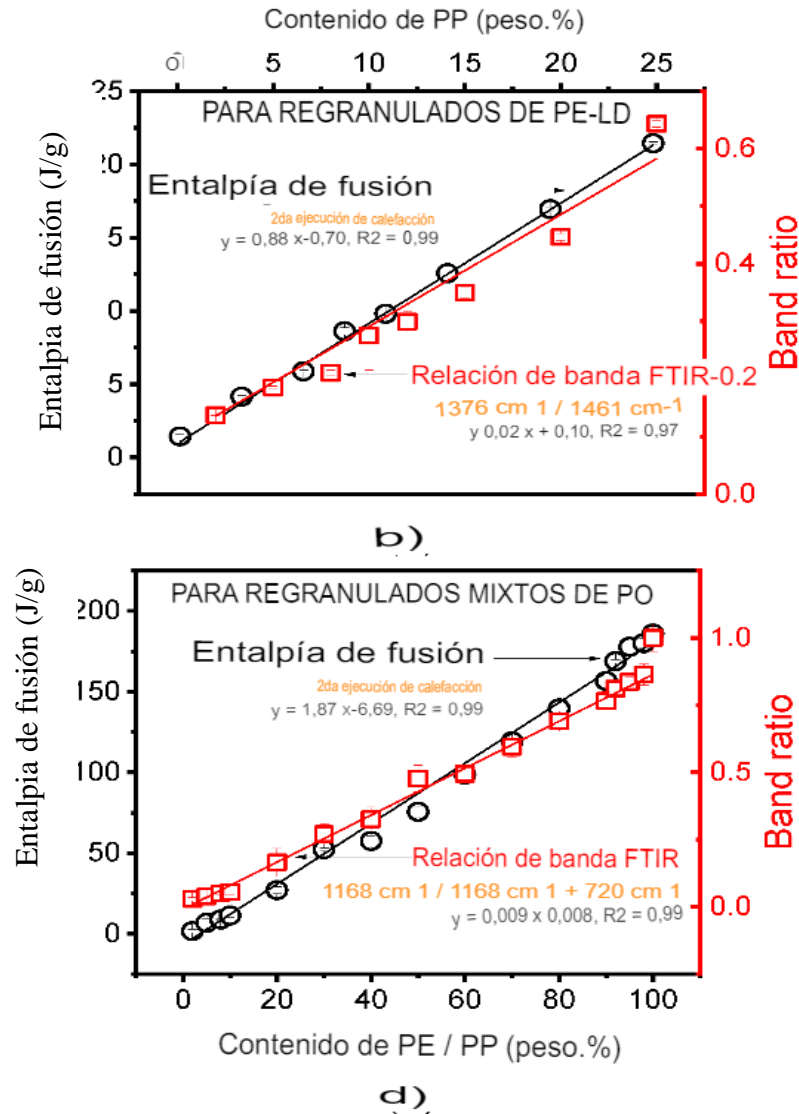


Fig. 13. Curvas de calibración para determinar PE/PP en las mezclas [52].

3) Determinación del índice de fluidez (MFI)

El valor del MFI se determinó siguiendo los procedimientos establecidos por la norma ASTM D1238, utilizando un equipo de prueba de la marca Atlas Electric Devices (**Fig. 14**). Para garantizar la precisión y coherencia de los resultados, se llevó a cabo el ensayo a las condiciones sugeridas por la norma para el PP, es decir, a una temperatura de 230°C y una carga de 2,16 kg para cada una de las mezclas analizadas [53]. El polímero PLAr se sometió a un proceso de secado en una estufa de la marca BINDER, con el propósito de eliminar la humedad presente en el material, el

PLAr se mantuvo en la estufa durante un periodo de 4 a 5 horas a una temperatura de 45 °C. Con el objetivo de obtener resultados confiables, se llevaron a cabo tres ensayos por cada mezcla, a partir de los cuales se determinó el promedio y la desviación estándar. La comparación de estas medidas antes y después de ser transformado el material, proporciona información valiosa sobre la degradación del material. Muchos investigadores han establecido relaciones del MFI con numerosas propiedades mecánicas, químicas y térmicas, como el límite elástico, la viscosidad, la distribución del peso molecular y la velocidad de corte [54].



Fig. 14. Equipo utilizado para determinar en índice de fluidez.

4) *Medidas de densidad relativa.*

La densidad fue determinada utilizando el método de desplazamiento, según lo establecido en la norma ASTM D792-20 [55]. Se utilizó un kit de densidad y balanza analítica. Como líquido de referencia se usaron 200 ml isopropanol con densidad de 0.79 g/cm³, y se aplicó la ecuación (2) para calcular las densidades correspondientes. Con el fin de obtener resultados confiables, se realizaron cinco medidas por muestra, las cuales fueron promediadas y se determinó la desviación estándar. Esta medida se puede utilizar para descubrir variaciones en la estructura y la composición en general durante el procesamiento de los materiales.

$$\delta_{muestra} = \frac{w_{seco}}{w_{seco} - w_{humedo}} \times 0.79 \frac{g}{cm^3} \quad (2)$$



Fig. 15. Balanza analítica y kit de densidad utilizados.

5) *Análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM)*

Las micrografías se obtuvieron en SEM de la marca JEOL-JSM 6490LV (**Fig.16**). Para mejorar la conductividad superficial de las muestras se recubrieron por pulverización catódica (sputtering) con oro (**Fig.17**). Esta técnica es útil en esta investigación debió a que revelan información sobre el material analizado como la morfología externa y la orientación de las fases de los materiales que componen la muestra, lo cual podría dar indicios sobre la miscibilidad de las mezclas.

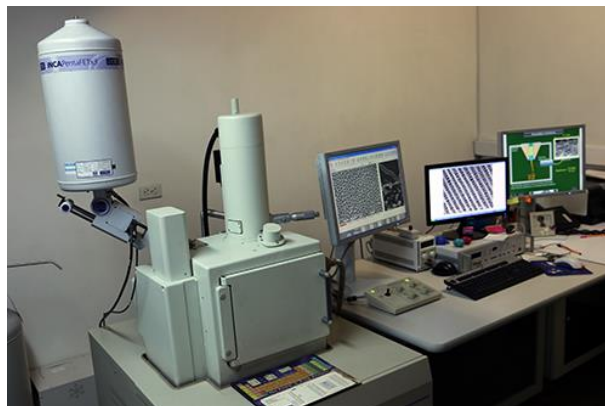


Fig. 16. Microscopio electrónico de Barrido[56].



Fig. 17. Muestras recubiertas en oro.

D. Ensayo de tensión de la materia prima y de las mezclas.

1) Inyección de Probetas.

Las probetas para los ensayos de tensión bajo las especificaciones de la norma ASTM-D 638-14, se inyectaron en un equipo de moldeo por inyección marca WELLTEC, Modelo TTI-90SEII con número de serie DH-20101833/35 (**Fig. 18**) [57]. Dicho equipo se encuentra instalado en el laboratorio de pruebas de calzado y polímeros avanzado, perteneciente al Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). En la figura 19 se puede observar la vista general del equipo (**Fig.19**), y en la **TABLA VIII** las condiciones de los ensayos para las mezclas. En la **TABLA IX**, se encuentran los perfiles de temperaturas.



Fig. 18. Inyectora Welltec TTI-90SEII.

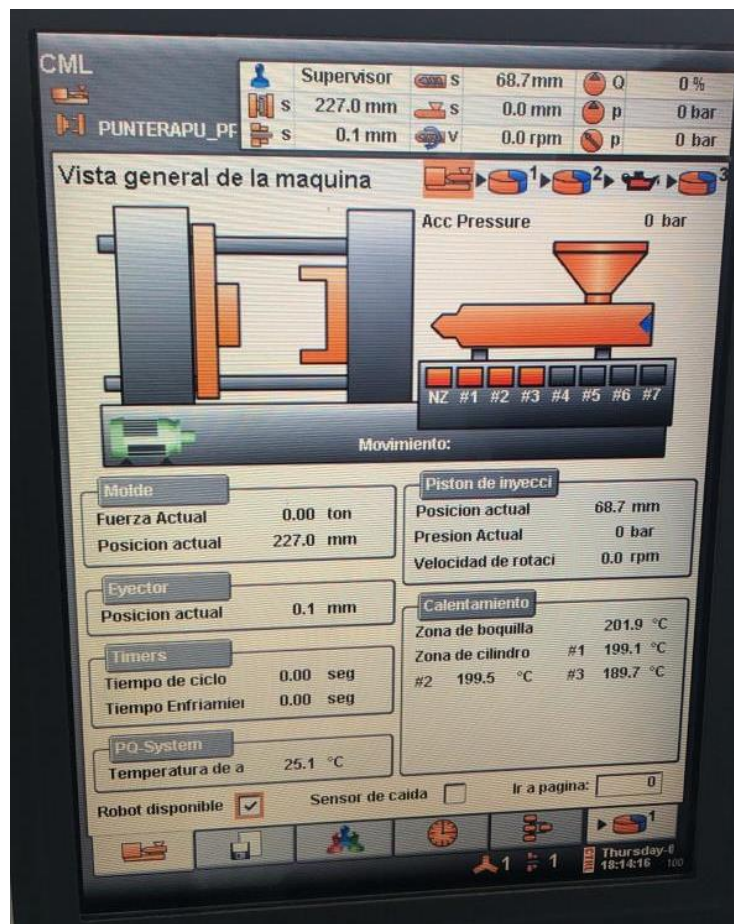


Fig. 19. Vista general del equipo.

TABLA VIII

CONDICIONES DE PROCESO DE INYECCIÓN PARA LAS MEZCLAS DE PPr EN HDPEr, LDPEr Y PLAr.

Parámetros de inyección					
Etapa	5	4	3	2	1
Velocidad (%)				50	60
Presión (bar)				65	50
tiempo de residencia (s)					3.00
presión por bloqueo del molde			20		
modo de expulsor			empuje		
Parámetros de sostenimiento					
Etapa	5	4	3	2	1
Velocidad (%)				50	60
Presión (bar)				65	50
tiempo de residencia (s)					3.00
retroceso de la inyección			si		
tiempo de enfriamiento (s)			20 (HDPEr-LDPEr)	-30 (PLAr)	
Parámetros de Plastificación					
Etapa	DEC	4	3	2	DEC
Velocidad de rotación (%)		50			
Contrapresión (bar)		18			
Velocidad (%)					100
Presión (bar)		40			90
Posición (mm)		38			43

TABLA IX

PERFILES DE TEMPERATURA.

Perfil de temperatura		
zona	Temperatura (C°)	
	HDPEr-LDPEr	PLAr
Boquilla	230	160
2	230	160
3	225	155
4	220	150

2) Ensayos de Tensión

El ensayo de Tensión fue realizado siguiendo los parámetros establecidos por la norma ASTM D638-14, mediante el empleo de una máquina universal de ensayos Shimadzu AGS-X 50 KN de doble columna, a una velocidad constante de 10 mm/minuto [57]. Utilizando un calibrador digital, se tomaron 3 medidas del ancho y de espesor de cada probeta, una medida en el centro de la probeta y las dos restantes fueron tomadas una a cada lado del centro con una separación de un centímetro (Fig. 20). A partir de estas medidas, se determinó los promedios y desviaciones estándar con los cuales se realizaron los cálculos posteriores para la construcción de los gráficos esfuerzo vs deformación, de acuerdo al procedimiento descrito por la norma de referencia. Se determinó el módulo de elasticidad siendo la pendiente de la zona lineal y la resistencia a la tensión siendo el máximo esfuerzo exhibido por la probeta. Se realizaron ensayos de tensión para cinco probetas de cada material y para cada una de las mezclas, posteriormente se promediaron los resultados y se determinó la desviación estándar.



Fig. 20. Probetas para flexión. Medición de ancho y espesor.

VII. RESULTADOS Y ANALISIS

A. Resultados del procesamiento de extrusión de las mezclas.

En la siguiente figura (**Fig.21**), se registran las imágenes de las mezclas obtenidas en el procesamiento. Durante este procedimiento, no se logró obtener la mezcla de 80 % PLAr con 20 % PPr. La incapacidad de lograr esta mezcla se debe a que el PLAr posee un alto flujo (baja viscosidad) a la temperatura de ensayo en comparación al PPr. Debido a esta característica, el PPr no logra adherirse adecuadamente al PLAr, lo que provoca la separación de los componentes en la mezcla.

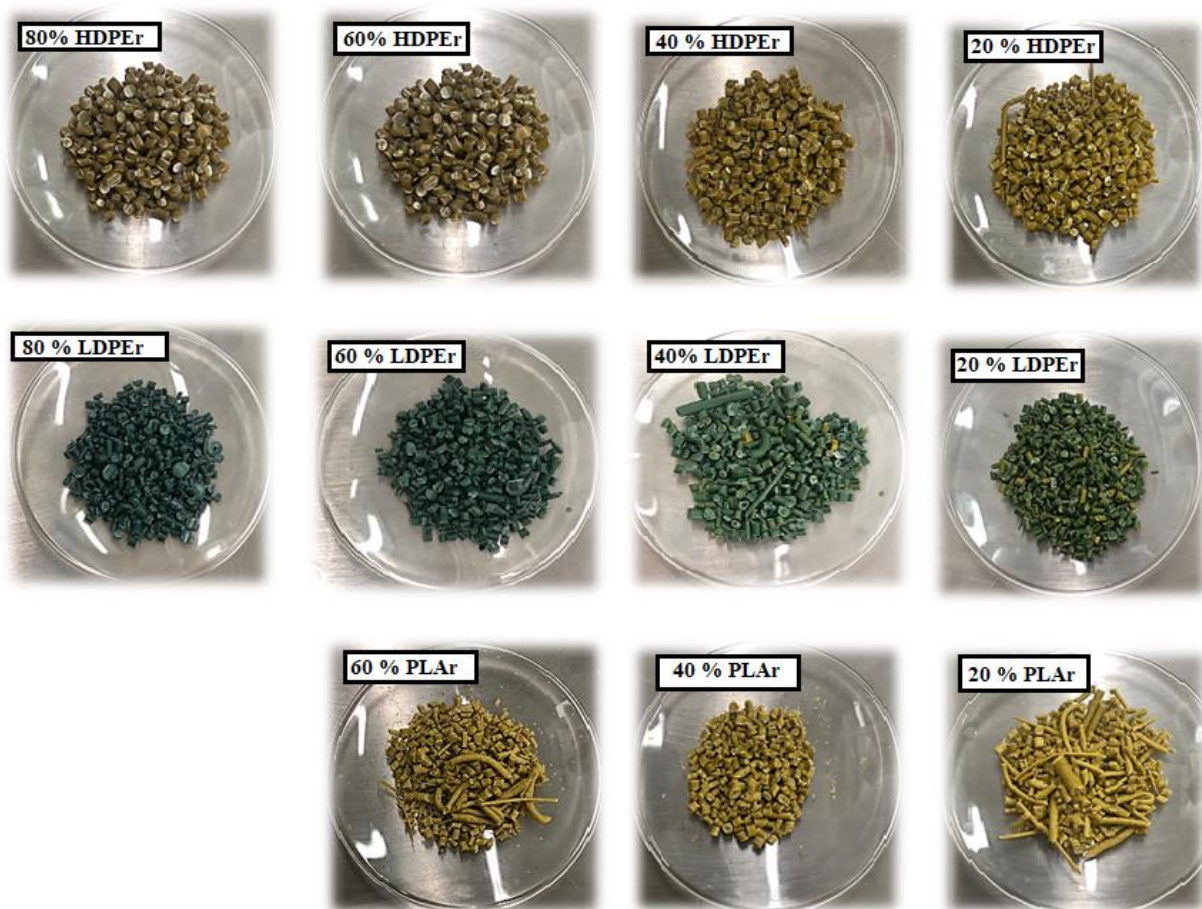


Fig. 21 Mezclas obtenidas por el proceso de extrusión.

B. Resultados y análisis de espectroscopia infrarroja por transformada de Furrier (FTIR)

1) Resultados y análisis por FTIR de la materia prima.

En la figura 22, se puede observar el espectro FTIR obtenido para el PPr utilizado en cada una de las mezclas (**Fig. 22**) y en la **TABLA X** se asignan las principales bandas del espectro obtenido para este material.

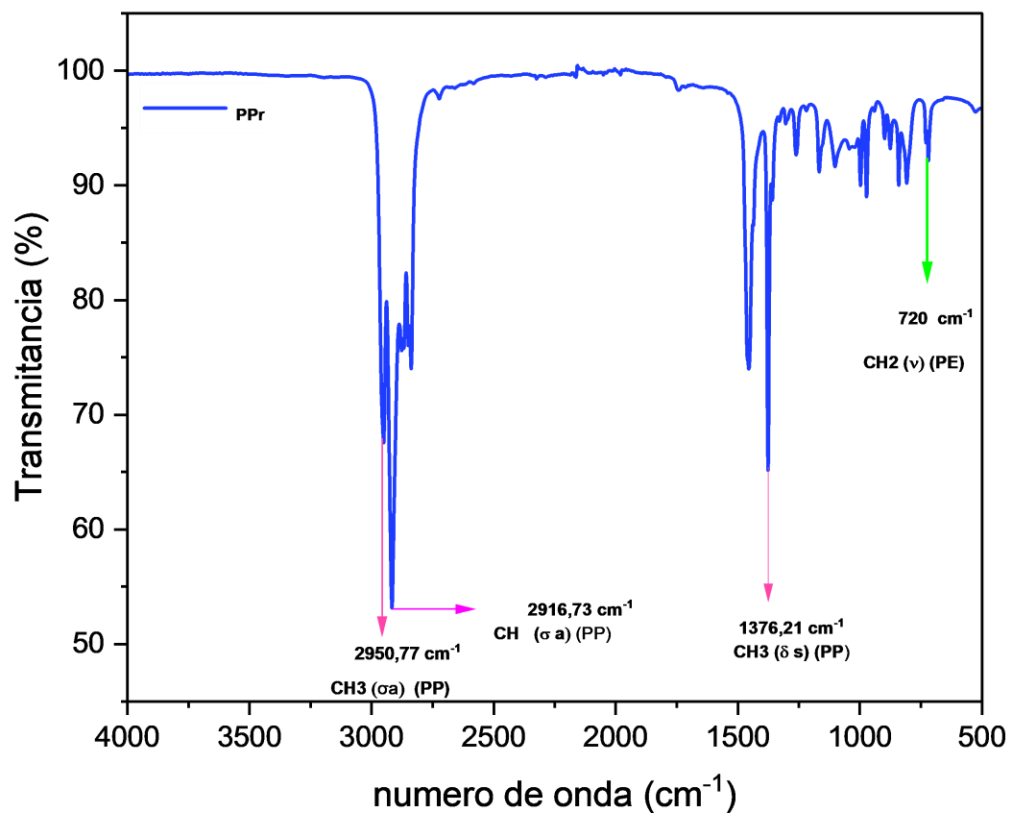


Fig. 22. Espectro FTIR de PPr.

TABLA X
BANDAS DE ABSORCIÓN EN EL PPr.

Numero de Onda cm ⁻¹	Tipo de vibración	Intensidad	Molécula o característica	Tipo de polímero
2950,77	Estiramiento asimétrico	Intensa	CH ₃	PP
2916,73	Estiramiento asimétrico	Intensa	CH	PE
2876,83	Estiramiento simétrico	Media	CH ₃	PP
2849,8	Estiramiento simétrico	Media	CH	PE
1376,21	Flexión simétrica	Intensa	CH ₃	PP
1261,44	Estiramiento simétrico	Débil	C-O	impureza u otro compuesto
997,63	Estiramiento simétrico	Débil	C-C	PP
899,14	Estiramiento simétrico	Débil	C-H	impureza u otro compuesto
841,01	Balanceo	Débil	C-H	PP
808,43	Balanceo	Débil	C-C	PP
719,66	Tijereo	Débil	CH ₂	PE

Nota: Tabla realizada en base a fuentes bibliográficas [58][59][60].

En estos resultados se presentan bandas de absorción que corresponden al PP, por ejemplo, la relacionada con el estiramiento asimétrico (σ_a) de los enlaces en el grupo CH₃, que se presenta alrededor de los 2950,77 cm⁻¹. También se observa la banda de absorción vinculada a la flexión simétrica (δ_s) de los enlaces en el grupo CH₃, en torno a 1376,21 cm⁻¹[61]. Estas bandas de absorción coinciden con las del PP. Además, se observan picos de absorción que no corresponde a las de PP, debido a la interacción de la luz con las impurezas y otros compuestos que trae consigo el material posconsumo. Se señalan las bandas de absorción características del PE (flechas verdes), por ejemplo, en 720 cm⁻¹ debido al movimiento de tijereo (ν) en los átomos en el grupo CH₂ [62]. Este hallazgo sugiere que el material en cuestión consiste en una mezcla de PP y PE, con una proporción mayor de PP. Esto se debe a que la relación entre las intensidades de dos bandas proporciona una medida cualitativa de las concentraciones de los grupos atómicos que las representan, y las intensidades de las bandas de absorción del PE son más débiles en comparación con las del PP [63].

En las figuras 23 y 24 (**Fig. 23 y Fig.24**), se observan los espectros FTIR obtenidos para el HDPEr y el LDPEr. Y en la **TABLA XI y XII**, se resumen los resultados FTIR obtenidos para el HDPEr y LDPEr respectivamente. En estos espectros se presentan picos de absorción característicos del PE, por ejemplo, los relacionados con los estiramientos simétricos y asimétricos de la molécula CH, que se dan alrededor de los 2915 cm^{-1} y 2848 cm^{-1} respectivamente[62]. Además, se presenta la banda correspondiente al movimiento de tijereo en torno a 720 cm^{-1} ; estos picos se encuentran señalados por las flechas naranjas. En estos espectros también se presentan picos no característicos del PE, debido a las absorciones de luz de las impurezas y otros compuestos que contiene el material por ser reciclado. Mediante FTIR también es posible diferenciar el HDPE del LDPE; por ejemplo, la intensidad de la banda asociada con el estiramiento de enlaces en el grupo CH, que se presenta alrededor de 1378 cm^{-1} , ya que es un indicativo de ramificaciones, y su porcentaje de transmitancia se emplea para cuantificar el grado de ramificación. Este pico está casi ausente en HDPE y en MDPE, pero es percibido fácilmente en el LDPE, ya que posee mayores ramificaciones [64]. Con base a lo anterior, podemos concluir que el HDPEr posee LDPE, ya que en su espectro se pueden evidenciar los picos $1376,30\text{ cm}^{-1}$; y en el caso del LDPEr se confirma que efectivamente se trata de LDPE por la presencia de la banda en $1377,23\text{ cm}^{-1}$.

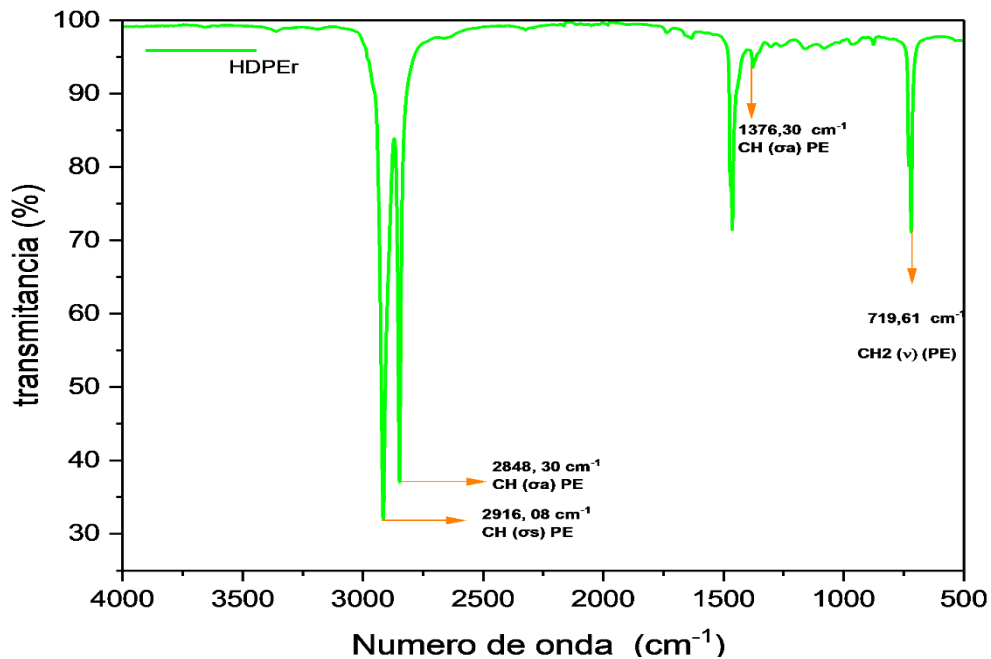


Fig. 23. Espectro FTIR de HDPEr

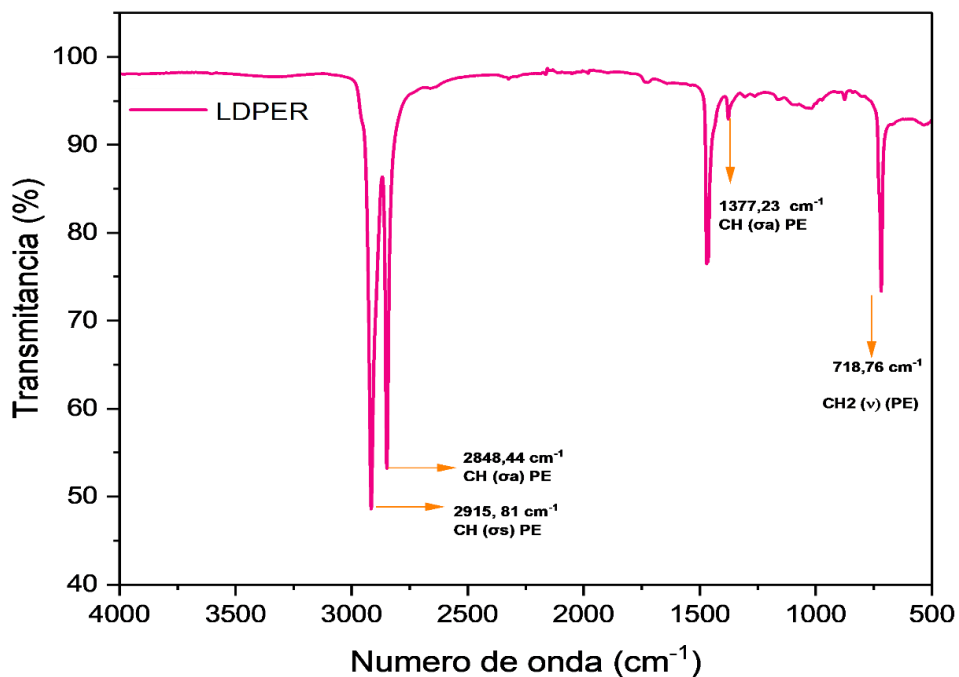


Fig. 24. Espectro FTIR de LDPEr

TABLA XI
TABLA BANDAS DE ABSORCIÓN EN EL HDPEr.

Numero de onda (cm^{-1})	Tipo de vibración	Intensidad	Molécula o característica	Tipo de polímero
2916,08	Estiramiento asimétrico	Intensa	CH	PE
2848,3	Estiramiento simétrico	Intensa	CH	PE
1715,65	Estiramiento simétrico	Débil	C-O	impureza u otro compuesto
1463,01	Estiramiento simétrico	Media	CH	PE
1376,3	Estiramiento simétrico	Débil	CH	PE
1170,76	Estiramiento asimétrico	Débil	C-O	impureza u otro compuesto
719,61	Tijereo	Media	CH ₂	PE

Nota: Tabla realizada en base a fuentes bibliográficas [62][58][60].

TABLA XII
BANDAS DE ABSORCIÓN DEL LDPEr

Numero de onda (cm^{-1})	Tipo de vibración	Intensidad	Molécula o característica	Tipo de polímero
2915,81	Estiramiento asimétrico	Intensa	CH	PE
2848,44	Estiramiento simétrico	Intensa	CH	PE
1470,74	Estiramiento simétrico	Media	CH	PE
1377,23	Estiramiento simétrico	Débil	CH	PE
718,7	Tijereo	Media	CH ₂	PE

Nota: Tabla realizada en base a fuentes bibliográficas [62][58][60].

Este análisis será complementado con los resultados de los ensayos DSC, ya que mediante FTIR no es posible diferenciar con certeza el tipo de PP y PE en el PPr, HDPEr y LDPEr.

En la figura 25 (**Fig. 25**), se observa las bandas de absorción características del PLAr, y en la **TABLA XIII** se resumen los resultados obtenidos para este material. En este espectro se evidencia una banda en $1747,98\text{ cm}^{-1}$ debido a las deformaciones de los enlaces del grupo carbonilo C=O y bandas en $1081,49\text{ cm}^{-1}$ que corresponde al estiramiento del enlace C-O en el grupo -CO-O que está presente en la unidad repetitiva del PLA (**Fig.5**) [67]. También se puede observar una banda de intensidad débil relacionada con la deformación del grupo OH, lo que indica que este material posee una cantidad de humedad.

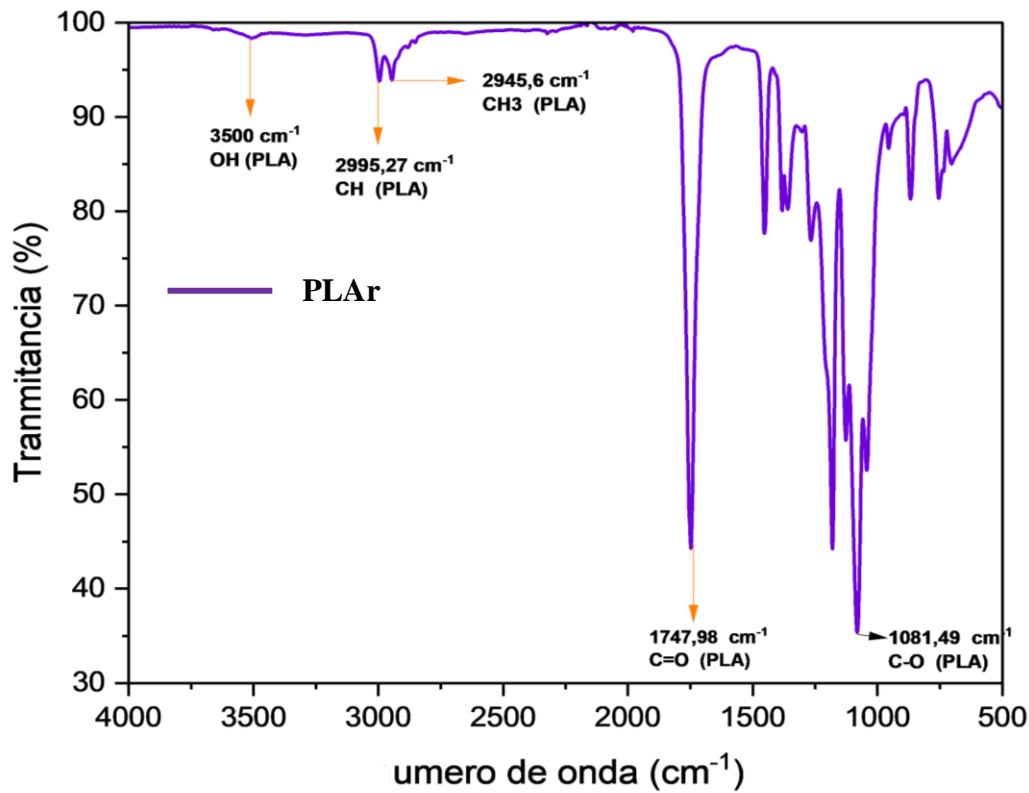


Fig. 25. Espectro FTIR de PLAr

TABLA XIII
BANDAS DE ABSORCIÓN DEL PLAr

Numero de onda (cm^{-1})	Tipo de vibración	Intensidad	Molécula o característica	Tipo de polímero
3450	Estiramiento simétrico	Baja	OH	PLA
2995,27	Estiramiento simétrico	Baja	CH	PLA
2945,6	Estiramiento simétrico	Baja	CH3	PLA
1747,98	Estiramiento simétrico	Alta	C=O	PLA
1453,75	Flexión simétrica	Media	CH	PLA
1382,23	Tijereo	Media	CH3	PLA
1180,66	Estiramiento asimétrico	Alta	C-O	PLA
1081,49	Flexión simétrica	Alta	C-O	PLA

Nota: Tabla realizada en base a fuentes bibliográficas.

2) *Análisis de resultados FTIR de las mezclas.*

En la siguiente figura podemos observar los espectros FTIR de las mezclas PPr en HDPEr (**Fig. 26**). Estos resultados muestran que con el aumento de porcentaje en peso de PPr en la mezcla, se hace presente el pico característico relacionado con el estiramiento simétrico del grupo CH₃ que posee el PP, que se da alrededor de 2950,75 cm⁻¹; esto indica un aumento de PP en la mezcla. También se puede observar, que con el aumento de la cantidad HDPEr en las mezclas, las bandas de absorción características del PE se hacen más intensas, por ejemplo, las que están asociadas con el estiramiento simétrico y asimétrico de la molécula CH (2915 cm⁻¹ y 2848 cm⁻¹). Esto señala un aumento de PE en la mezcla. En la zona de 1500 cm⁻¹ a 500 cm⁻¹, la adición de PPr aumenta la intensidad de los picos asociados al PP, por ejemplo, el pico relacionado con la flexión simétrica CH₃ en 1376,21 cm⁻¹, y a su vez la incorporación de HDPEr eleva la intensidad de los picos característicos del PE, por ejemplo, el pico asociado con el tijereo de los enlaces en la molécula CH₂ en 720 cm⁻¹.

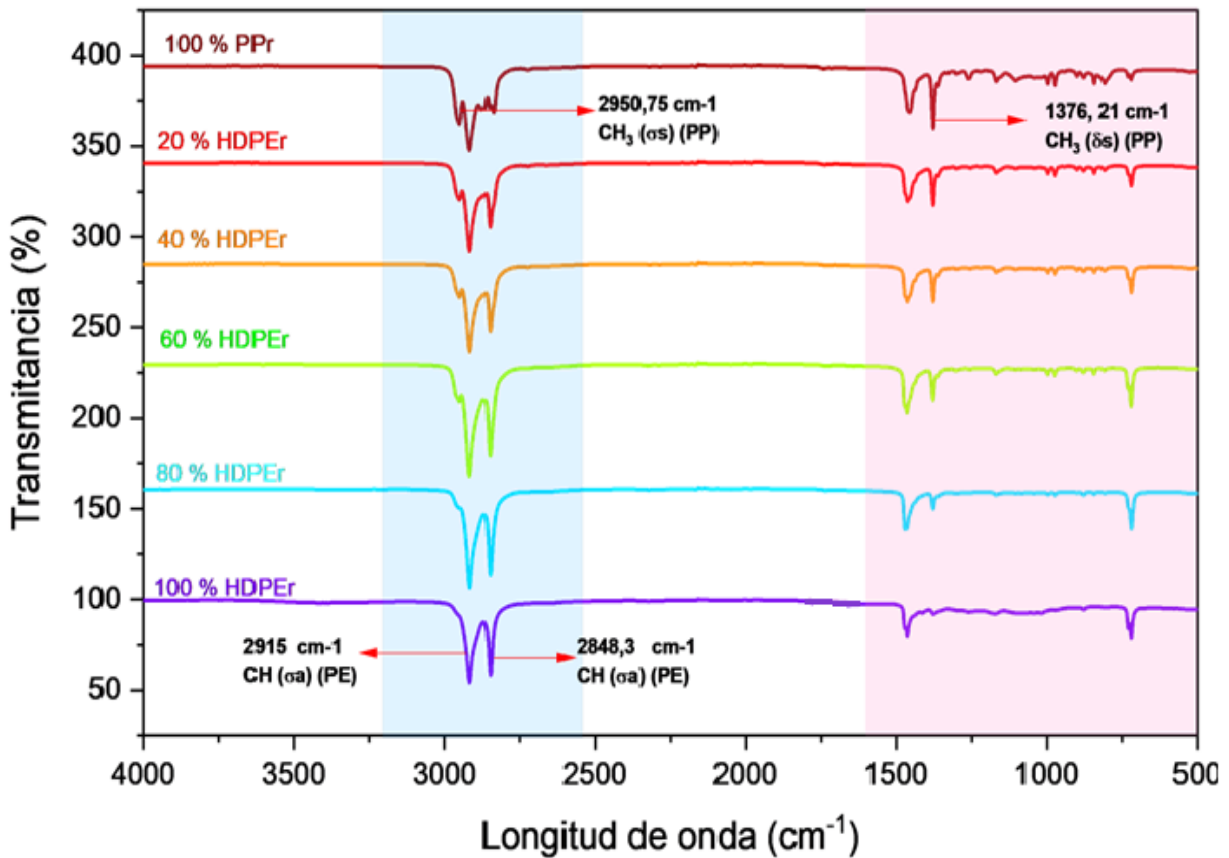


Fig. 26. Espectros FTIR de las mezclas HDPEr- PPr

En la figura 27, podemos observar los espectros para las mezclas de PPr en LDPEr (**Fig. 27**). En el caso de las mezclas LDPEr-PPr, se presenta el mismo comportamiento de las mezclas anteriores, ya que al aumentar la cantidad de PPr surge y aumenta la intensidad de los picos relacionados con el estiramiento y flexión de los enlaces del CH_3 (2950 cm^{-1} y $1376,21 \text{ cm}^{-1}$) del PP. De la misma manera, al aumentar el porcentaje en peso del LDPEr incrementa la intensidad de la banda de absorción relacionada con el tijereo de los enlaces en CH_2 (720 cm^{-1}) por el aumento del PE en la mezcla.

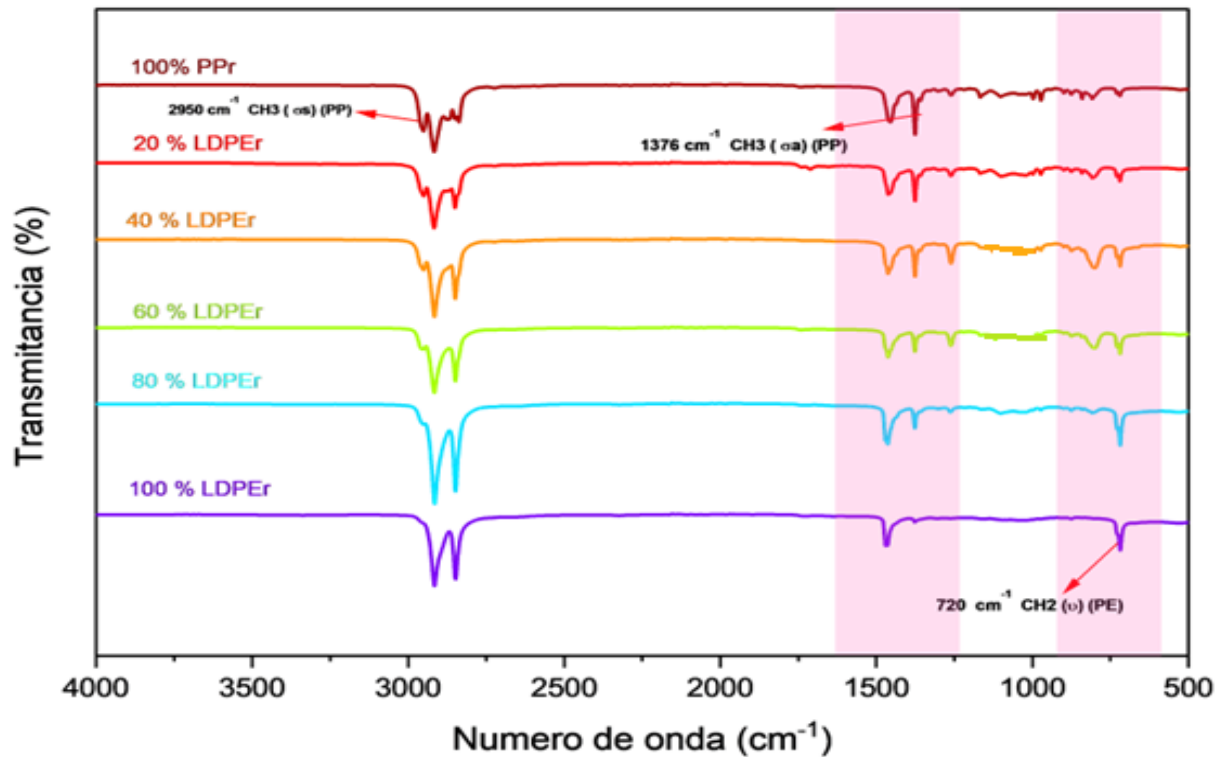


Fig. 27 Espectros FTIR de las mezclas LDPEr- PPr

Para los espectros de las mezclas de PLAr-PPr, se observa claramente cómo el aumento de PPr genera e intensifica los picos característicos de PP, por ejemplo, los relacionados con los grupos CH₃ y CH, que se presentan en la zona entre 3000 cm^{-1} y 2500 cm^{-1} . También se evidencia en la región de 2000 cm^{-1} hasta 500 cm^{-1} la presencia y aumento en la intensidad de los picos de absorción relacionados con las moléculas C=O y C-O (1747 cm^{-1} y 1081 cm^{-1}) al incrementar el PLAr. En la figura 28, se observa los resultados FTIR para las mezclas de PPr en PLAr (**Fig. 28.**)

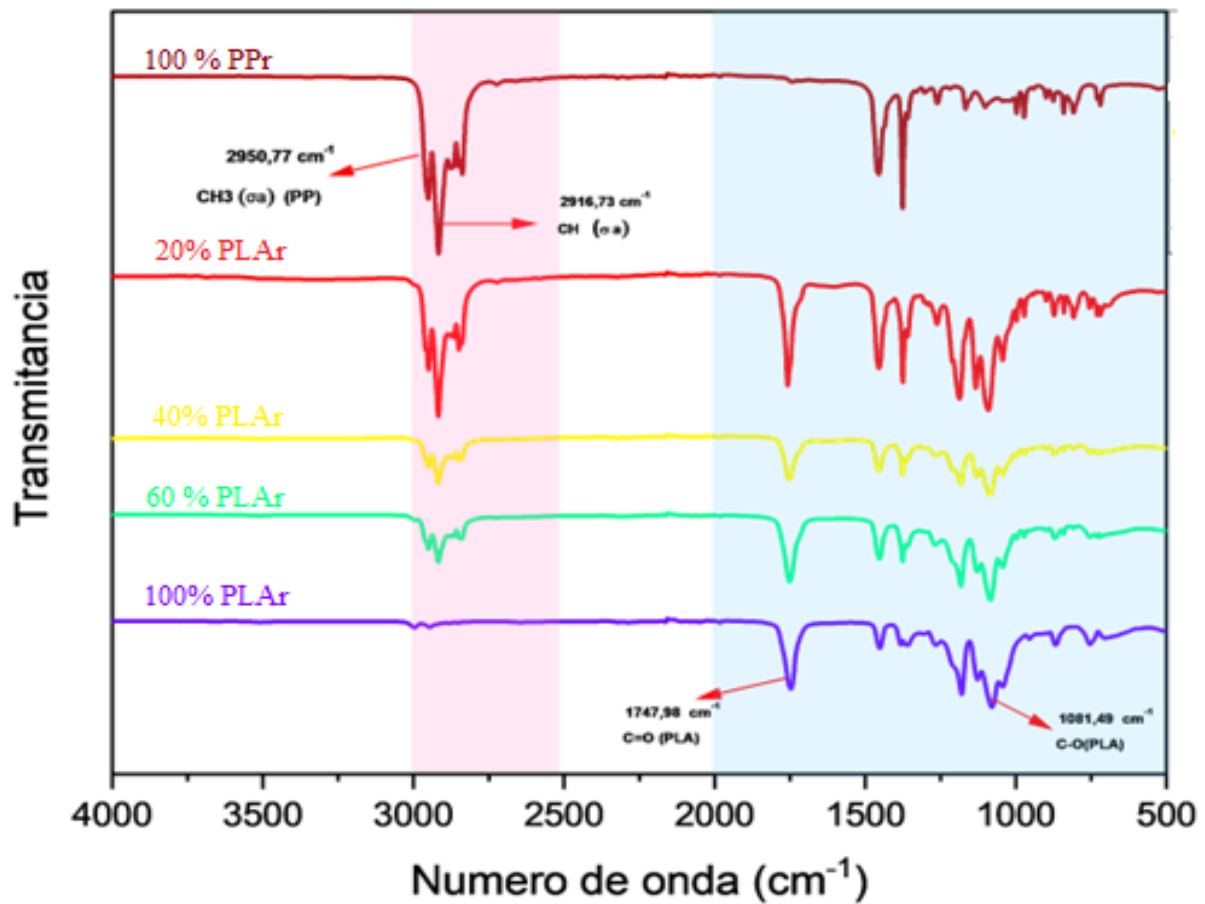


Fig. 28. Espectros FTIR de las mezclas PLAr - PPr

En general, los espectros FTIR mostraron que no existe un cambio en las interacciones intermoleculares del HDPEr, LDPEr y PLAr al ser mezclado con PPr. Sin embargo, sí se evidenciaron variaciones de intensidad de los diferentes picos de absorción, lo cual es consecuencia de la mayor proporción de uno u otro polímero. También se evidenció degradación u oxidación en las mezclas, debido a su reprocesamiento e impurezas de los materiales de partida.

C. Resultados de calorimetría diferencial de barrido (DSC).

En este tipo ensayo, el programa de temperaturas utilizado permitió definir el comportamiento de cristalización y fusión de las materias primas y de las mezclas. Los resultados obtenidos de los ensayos de DSC para los materiales de partida y sus respectivas mezclas se presentan en la **TABLA XIV**. En ella, se resumen las temperaturas de transición junto a sus respectivas entalpías de fusión y cristalización. Asimismo, se evidencian los porcentajes de cristalinidad, los cuales han sido determinados utilizando las entalpías de fusión y los valores teóricos, de acuerdo con la ecuación (2).

TABLA XIV
RESULTADOS DE ENSAYOS DSC PARA LA MATERIAS PRIMAS Y LAS RESPECTIVAS MEZCLAS

Muestra	Transición (°C)					Cristalización			% Cristalinidad		
	Transición (°C)			ΔH (J/g)		Transición (°C)			ΔH (J/g)		
	1	2	3	2-1	3	1	2	3	2-1	3	
PPr		126,1	164,42	6,95	56,45		113,18	123,25	94,49	2,37	27,01
HDPEr 20%	112,33	125,55	164,04	14,97	52,94		112,33	121,92	107,7	5,11	25,33
HDPEr 40%	110,15	125,1	163,81	27,12	42,88	94,2	112,12	121,35	111,1	9,26	20,52
HDPEr 60%	112,12	127,16	165,22	44,93	26,14	93,77	109,77	118,02	105,1	15,33	12,51
HDPEr 80%	111,9	126,45	164,93	90,03	10,49	57,73	94,63	110,67	112,9	30,73	5,02
HDPEr	111,9	126		121,7		94,63	111,54		114,4	41,54	0,00
LDPEr 20%	110,2	125,32	163,45	24,52	47,63		113,82	123,29	102,6	8,37	22,79
LDPEr 40%	112,76	125,56	163,54	42,65	32,58	96,33	113,4	121,89	95,57	14,56	15,59
LDPEr 60%	112,97	126,38	164,94	60,76	19,89		112,58	119,37	98,94	20,74	9,52
LDPEr 80%	111,9	125,61	164,41	90,11	10,4	98,25	113,63		90,45	30,75	4,98
LDPEr	110,2	126,03	164,38	116	1,31	95,48	113,04		114,5	39,59	0,63
PLAr 20%	100.03*	126,49	164,97	4,93**	48,97		112,97	121,36	80,48	-----	23,43
PLAr	52.11*	95,61	163,66	-38,33**	25,19					-----	26,91

*Transición vítrea

**Sólo se integra la transición 2

En la **TABLA XV**, se puede observar los porcentajes en masa de PE y PP, para las muestras de PPr con HDPEr y LDPEr, y sus respectivas materias primas, los cuales fueron determinados mediante las ecuaciones de la figura 13 (**Fig.13**).

TABLA XV
PORCENTAJES DE PE Y PP EN LAS MEZCLAS.

Mezclas	PE (%)	PP (%)
0% HDPEr-100 % PPr	10,96	89,04
20% HDPEr -80 % PPr	22,04	77,96
40% HDPEr -60 % PPr	38,74	61,26
60% HDPEr -40 % PPr	63,22	36,78
80% HDPEr -20 % PPr	89,56	10,44
100 % HDPEr -20 % PPr	100,00	0,00
20% LDPE - 80% PPr	33,98	66,02
40% LDPE - 60% PPr	56,69	43,31
60% LDPE - 40% PPr	75,34	24,66
80% LDPE - 20% PPr	89,65	10,35
100 % LDPE - 0% PPr	98,88	1,12

Estos resultados indican que con el aumento de HDPEr y LDPEr en las mezclas, existe un aumento proporcional de PE en la muestra analizada, lo cual coincide con la caracterización inicial realizada para el HDPEr y LDPEr por su alto contenido de PE. Además, demuestra la exactitud de las curvas de calibración utilizadas en este estudio con los porcentajes esperados en cada una de las mezclas.

1) *Análisis de los resultados de DSC para las materias primas*

Dado a que la temperatura de transición vítrea (T_g) de las poliolefinas se da a muy bajas temperaturas, no fue posible observarla en este ensayo. El termograma de fusión y cristalización del PPr se observan en la siguiente figura (**Fig. 29**).

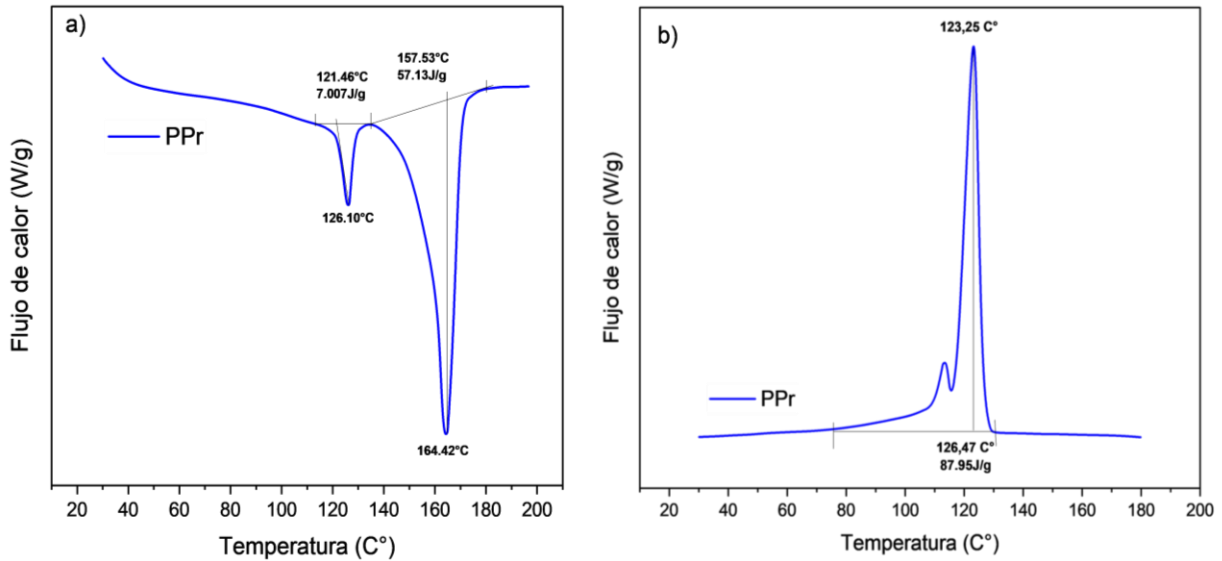


Fig. 29. Termogramas del PPr. a) Fusión, b) Cristalización.

El análisis calorimétrico del PPr, y con el cual se realizaron todas las mezclas permite inferir que este material es un homopolímero, mostrando una endoterma bien definida con un pico de fusión a 164.42°C [61]. Sin embargo, se observa otra endoterma de menor intensidad con un mínimo en 126.10°C, característico de un HDPE [65]. Estos resultados permiten concluir que el material de partida es una mezcla de PP con HDPE, lo que corrobora los resultados del análisis por FTIR. Además, se puede inferir que estos materiales son inmiscibles ya que se presenta por separado sus puntos de fusión. Realizando el procedimiento descrito en la metodología y empleando curvas de calibración sugeridas [52], se calculó el porcentaje de HDPE, el cual está alrededor del 11 % para la muestra analizada (**TABLA XV**).

En la siguiente figura se puede observar el termograma obtenido para el HDPEr (**Fig. 30**). Este termograma muestra el comportamiento de fusión y cristalización típico del HDPE [65]. Se observa también la presencia de una transición a menor temperatura separada de la principal, indicando que está mezclado con LDPE. Lo que concuerda con los resultados del FTIR (**Fig. 23**). En el termograma de cristalización, se puede observar dos señales exotérmicas atribuidas a la cristalización del HDPE y del LDPE.

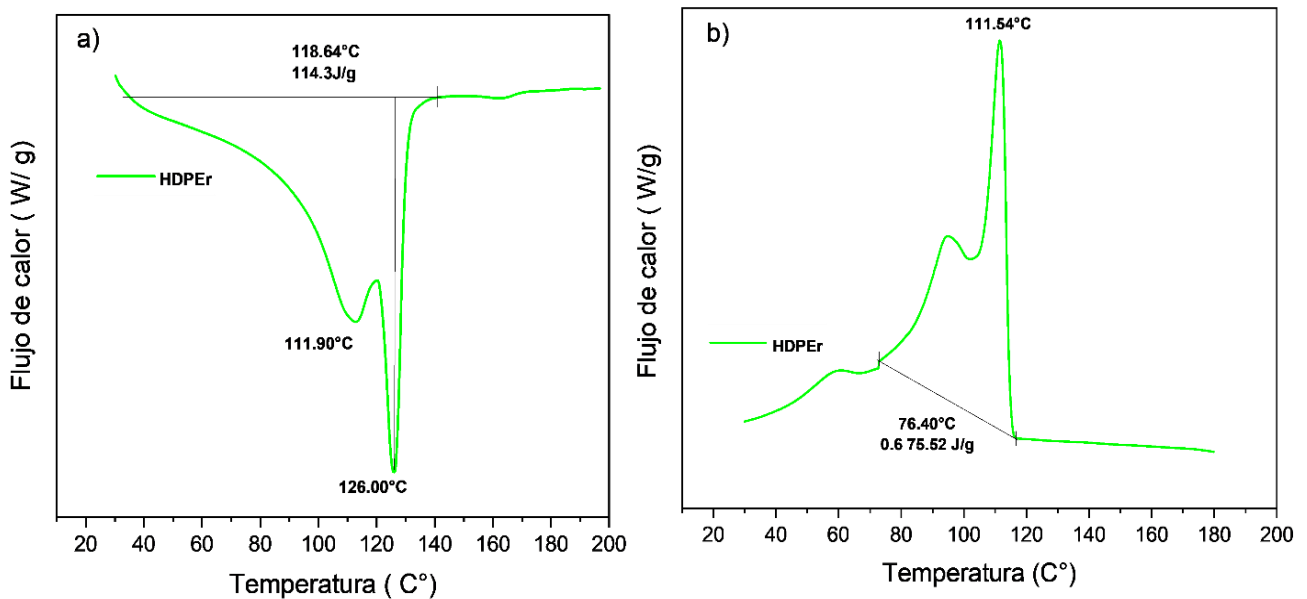


Fig. 30. Termogramas del HDPEr. a) Fusión, b) Cristalización.

Por otro lado, en la figura 31, se observa los termogramas del material denominado LDPEr (**Fig.31**). Este termograma indica que el material presenta una alta temperatura de fusión que se asocia con la transición típica del HDPE y no con la de un LDPE [65]. Es posible que este material corresponde a un LLDPE, debido a que en la transición de fusión se observa la presencia de un pico no resuelto a menor temperatura, no tan diferenciado como lo observado para el HDPEr. Este comportamiento se asocia comúnmente al LLDPE debido a la presencia de un comonomero α -olefínico que co-cristaliza con el comonomero lineal [66]. También se presenta una transición correspondiente al PP, el cual está presente en muy baja. En la figura 31.b), podemos observar las exotermias típicas de cristalización para este polímero.

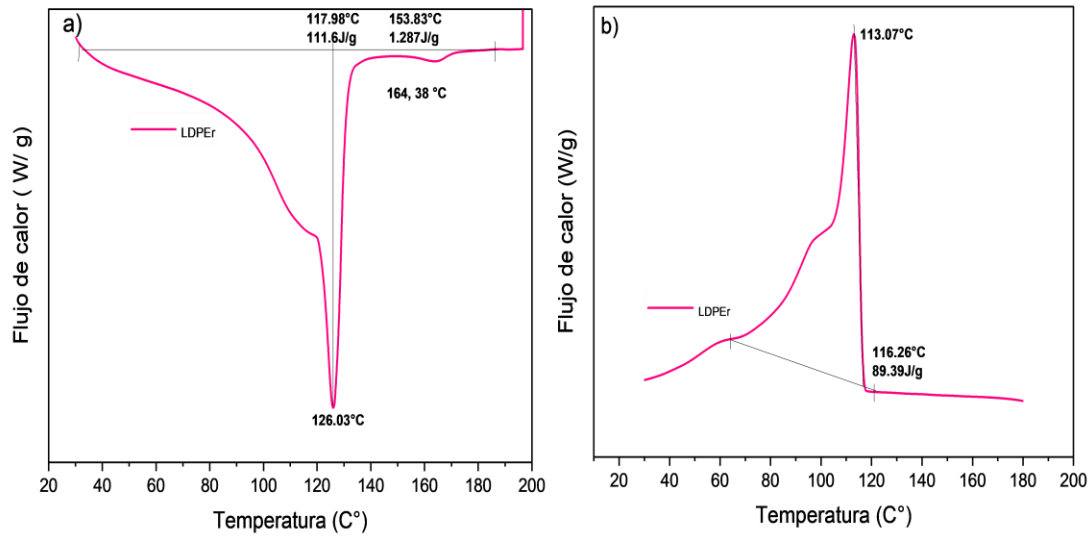


Fig. 31 Termogramas del LDPEr. a) Fusión, b) Cristalización.

En la figura 32, se observa el termograma para el material PLAr (**Fig. 32**). Del comportamiento térmico del PLAr se deduce que es un material semicristalino, en el que se visualizó una transición vítrea, una cristalización fría o proceso de cristalización exotérmica en el fundido, seguido de la endoterma de fusión de estos cristales. La cristalización fría se ha atribuido a la formación de múltiples estados cristalinos asociados con una autonucleación exotérmica por encima de la T_g , que se favorece en el ciclo de calentamiento [67].

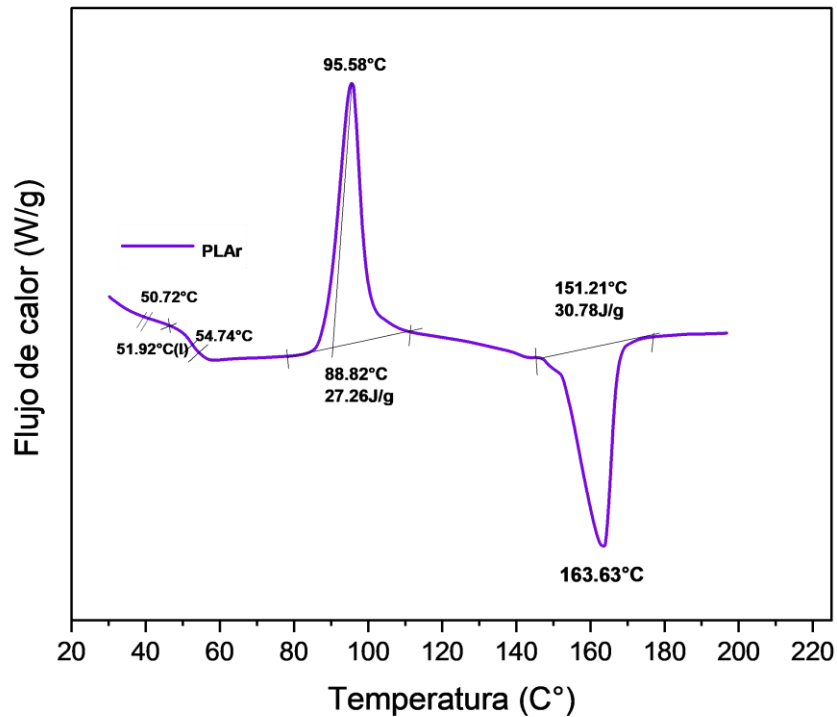


Fig. 32. Termogramas del PLAr.

2) Análisis de resultados de DSC para las mezclas.

En las figuras 33 y 34, se observan las termogramas de fusión y cristalización para las mezclas HDPEr-PPr y LDPEr-PPr. Estos termogramas presentan las transiciones características de cada material de partida y un aumento proporcional del calor de fusión con el aumento de la fracción de PE y viceversa. Las temperaturas de fusión de los componentes permanecen prácticamente invariables para todas las mezclas, lo que indica la presencia de dos fases cristalinas bien diferenciadas. Sin embargo, en cada uno de las termo gramas de cristalización podemos observar, que el aumento del % en peso de PP en PPr-HDPEr y PPr-LDPEr da como resultado una disminución en la entalpía de cristalización del PE en las mezclas, mientras que el PP generalmente presenta una tendencia creciente, como se resume en la **TABLA XIV**. Estos resultados se encuentran en concordancia con los de otros estudios que indican, que la disminución de la entalpía de cristalización podría atribuirse a las diferentes tasas de cristalización de PP y HDPE, y esto a su vez en el tamaño de los cristales. La combinación de HDPE es capaz de disminuir el tamaño de las

esferulitas de PP, liberando menos energía durante la cristalización en comparación con los cristales en el HDPE [68].

Además, en las temperaturas de cristalización se observa una pequeña variación, donde la cristalización del PP se da a una menor temperatura con el aumento de HDPEr y el del PE se da mayor temperatura al disminuir el porcentaje de PPr. Esto podría indicar que HDPE afecta la tasa de cristalización del PP. Además, se observa que para mezcla con 20 % de PPr, se aprecia un solo pico de cristalización. Existe literatura que informa que para altos contenidos de HDPE en mezclas de PP-HDPE, se superponen los dos picos, presentándose las dos cristalizaciones a una sola temperatura, lo que podría indicar una miscibilidad parcial [69]. Este mismo comportamiento lo observamos en las mezclas 20 % PPr-LDPEr.

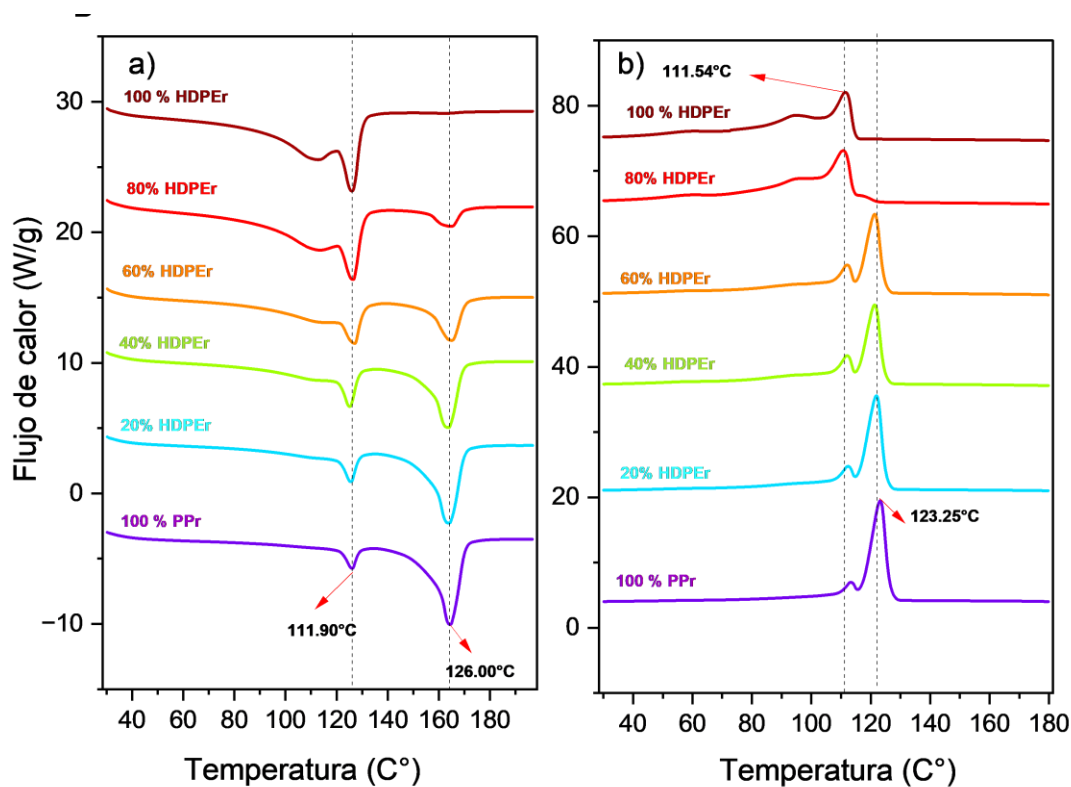


Fig. 33. Termograma de las mezclas HDPEr-PPr. a) Fusión, b) Cristalización.

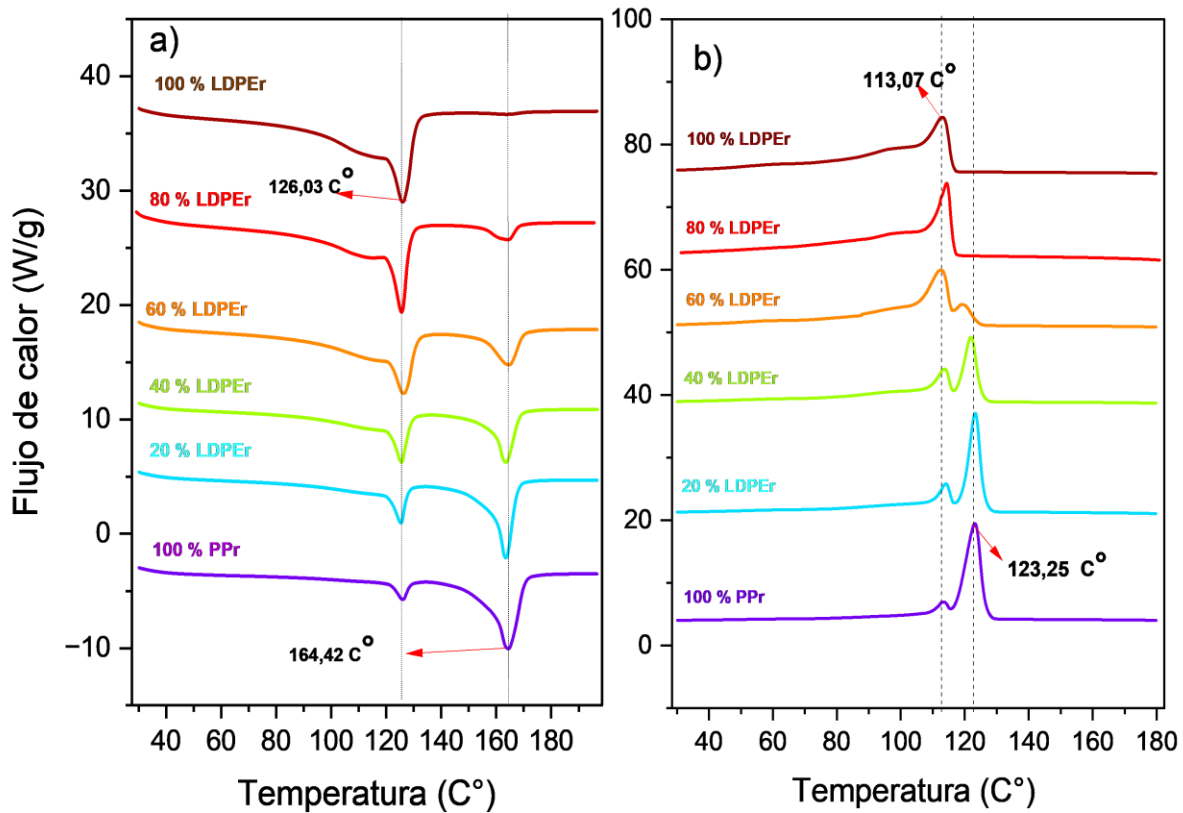


Fig. 34. Termograma de las mezclas LDPEr-PPr. a) Fusión, b) Cristalización.

Con respecto al análisis de las mezclas de PLAr-PPr, la mezcla de PLAr con 20% de PPr no mostró el comportamiento observado para el PLAr sin mezclar. Se observó una T_g a 100.03 °C, mucho mayor que la T_g del PLA puro (alrededor de 53 °C), pero no se observó la cristalización fría del PLAr alrededor de los 95 °C, ni tampoco la endoterma de fusión asociada a los cristales de PLA. Sólo se observa, además de la transición vítrea del PLA, las dos endotermas correspondientes al PPr de partida: 164.97 °C del homopolímero PP y 126.49 °C del PE (recordando que contiene una baja cantidad de PE, como se mencionó al inicio de este análisis). El calor de fusión de estas dos endotermas parece deberse únicamente a los cristales de PPr y la tendencia es prácticamente la misma al PPr sin mezclar. Al parecer el PPr impide la cristalización del PLAr e inmoviliza sus cadenas aumentando su transición vítrea a la temperatura de su autonucleación e impidiendo la cristalización en frío [70]. Se sabe que el PLAr y el PPr son intrínsecamente inmiscibles debido a la diferencia de polaridad, pero por tener ambos una alta fluidez puede existir una buena dispersión

en el fundido y, dado que el PP cristaliza en el enfriamiento y no así el PLAr, la dispersión de los cristales estables de PP en el dominio de PLA, impide su nucleación y lo rigidiza, fragilizando el material resultante. En la figura 35, observamos los termograma para las mezclas de PPr en PLAr.

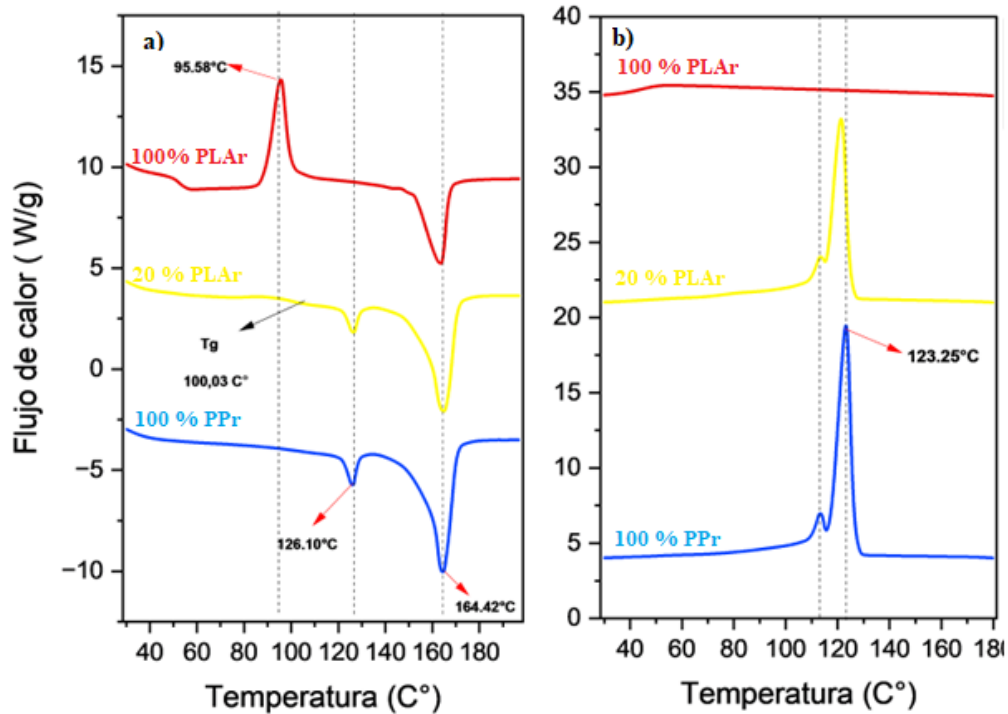


Fig. 35. Termograma de las mezclas PLAr-PPr. a) Fusión, b) Cristalización.

En la figura 36, se muestra que con el aumento en el % en peso de PPr tanto para las mezclas PPr-HDPEr como para el PPr -HDPEr, la cristalinidad del PP en la mezcla aumentó y la cristalinidad del PE disminuyó, lo que concuerda con lo descrito anteriormente sobre las entalpías de cristalización. En cuanto a la cristalinidad global, se observa que a mayor contenido de PE, mayor es la cristalinidad, sin embargo, esta tendencia no es lineal (se observa un punto de inflexión en las mezclas con 60% HDPEr y LDPEr), debido a que el PP y PE están formados por lamelas de diferente grosor y grado de perfección y la cinética de cristalización de sus mezclas puede ser muy compleja en relación con el comportamiento de cristalización de cada componente [71].

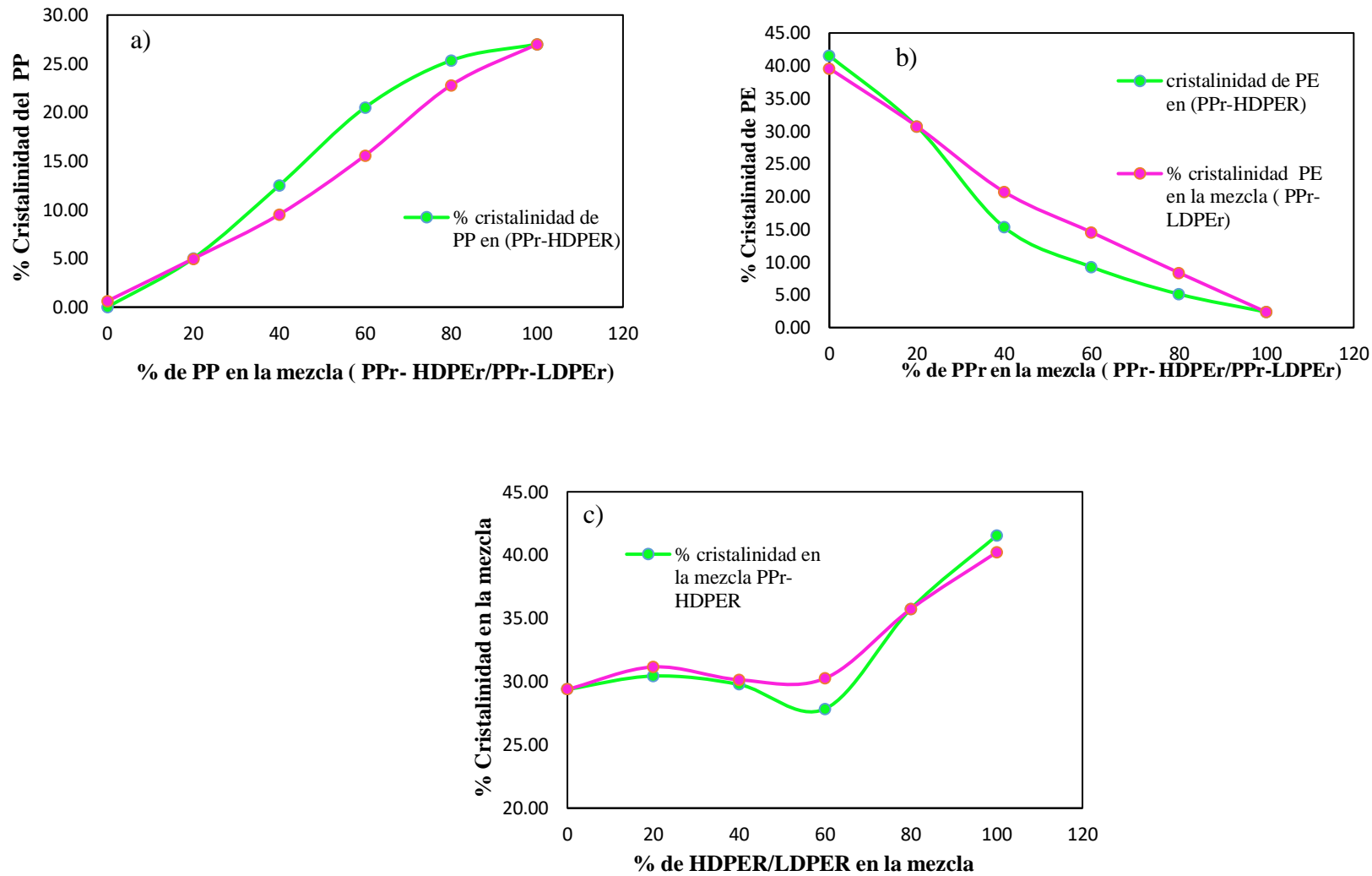


Fig. 36 Relación entre la cristalinidad. a) del PP y porcentaje de PP en la mezcla, b) del PE y porcentaje de PP en la mezcla, c) de la mezcla y porcentaje de PE en la mezcla

D. Resultados de las medidas de MFI

1) Resultados de las medidas de MFI de la materia prima

En la **TABLA XVI**, también podemos observar los valores de MFI para cada una de las materias primas.

TABLA XVI
VALORES DE MFI DE LA MATERIA PRIMA Y DE MEZCLAS

Muestra	MFI (g/ 10 min)	TEMPERATURA (C°)	CARGA (Kg)
PP	13,61 ± 0,33	230	2,16
HDPE 20%	8,14 ± 0,15	230	2,16
HDPE40%	4,71 ± 0,21	230	2,16
HDPE60%	2,22 ± 0,03	230	2,16
HDPE 80%	1,30 ± 0,16	230	2,16
HDPE	0,60 ± 0,04	230	2,16
LDPE 20%	11,21 ± 0,30	230	2,16
LDPE40%	8,91 ± 0,51	230	2,16
LDPE60%	5,81 ± 0,35	230	2,16
LDPE 80%	4,20 ± 0,13	230	2,16
LDPE	3,59 ± 0,23	230	2,16
PLA 20%	13,94 ± 0,10	230	2,16
PLA 40%	14,32 ± 0,33	230	2,16
PLA 60%	16,23 ± 0,44	230	2,16
PLA	18,01 ± 0,08	190	2,16

Los ensayos para el PPr, se realizaron bajo las condiciones definidas para PP por la norma ASTM 1238. Se decidió realizar los ensayos para el HDPEr y LDPEr bajo las mismas condiciones, con la finalidad de observar la tendencia de la variación del valor del MFI con la variación del porcentaje de PPr, debido a que las condiciones sugeridas por la Norma (190 C°, 2,16 Kg) para el HDPE y LDPE no permitió la fluidez del material.

En el caso del PLAr, no fue posible realizar esta medición, ya que en literatura se recomienda hacerla bajo las mismas condiciones del PP. Sin embargo, el flujo del material utilizado para estas

condiciones no fue continuo y por lo tanto las desviaciones estándar de los ensayos son muy elevadas, por lo que se descartó este valor. Se experimentó a condiciones de temperatura más bajas (190°C - 220°C); sin embargo, a estas temperaturas el flujo seguía siendo discontinuo [72][73]. Esto se le atribuye a la cantidad de humedad en el polímero, la cual debido a su evaporación genera burbujas dentro de capilar del equipo, lo que interrumpen el flujo del PLAr. En la siguiente figura se puede observar los extruidos para cada uno de las materias primas, donde se evidencia la apariencia rugosa de la superficie de los extruidos (**Fig.37**).

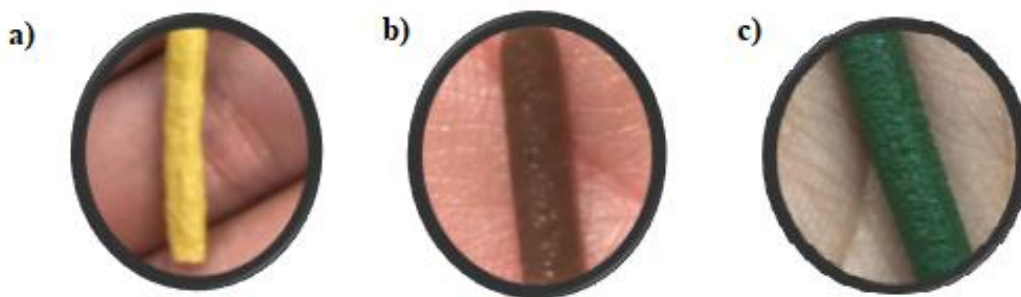


Fig. 37 Apariencia de extruido para los materiales de partida. a) PPr, b) HDPEr y c) LDPEr.

Según un estudio sobre poliolefinas recicladas extruidas, esta rugosidad superficial generalmente está relacionada con un fundido no homogéneo, es decir, con una mezcla donde existe una diferencia entre las transiciones térmicas de los componentes de cada material tales como entalpías de fusión y formación de cristales, lo que también se asocia a una inmiscibilidad de los componentes [41]. Lo cual se encuentra acorde con lo analizado anteriormente en los termogramas DCS de los materiales.

Después de secar el material PLAr en una mufla con el procedimiento descrito en la metodología, se logró determinar valores de MFI a 190°C con una carga de 2.16 Kg, debido a que a 230°C el material presentaba muy poca viscosidad y por lo tanto el tiempo para cortar para cada uno de los extruidos era muy limitado, lo que conducía a una desviación estándar muy alta. El valor de MFI para este material estuvo acorde a los encontrados en la literatura [73].

La figura 38, señala que PPr, presenta un mayor índice de fluidez que el HDPEr y el LDPEr, lo que indica que el PPr poseen menor peso molecular, ya que el MFI es una medida inversa del peso molecular del material. Seguramente este material ha sufrido una reducción del tamaño molecular en el PPr debido a la degradación termoxidativa durante el procesamiento. En el caso del HDPEr y el LDPEr, presentan menor MFI siendo mayor en el LDPEr, esto quiere decir que son polímeros más viscosos. Estos resultados son consistentes a los encontrados en la literatura para los materiales vírgenes que presentan menor valor MFI, ya que la degradación, impurezas o aditivos de los materiales reciclados reducen la viscosidad de polímero induciendo a un mayor valor del MFI [74].

2) Análisis de resultados de MFI para las mezclas.

La figura 38, muestra la tendencia del valor de las medidas de MFI de las mezclas al aumentar el contenido de PPr (Fig. 38).

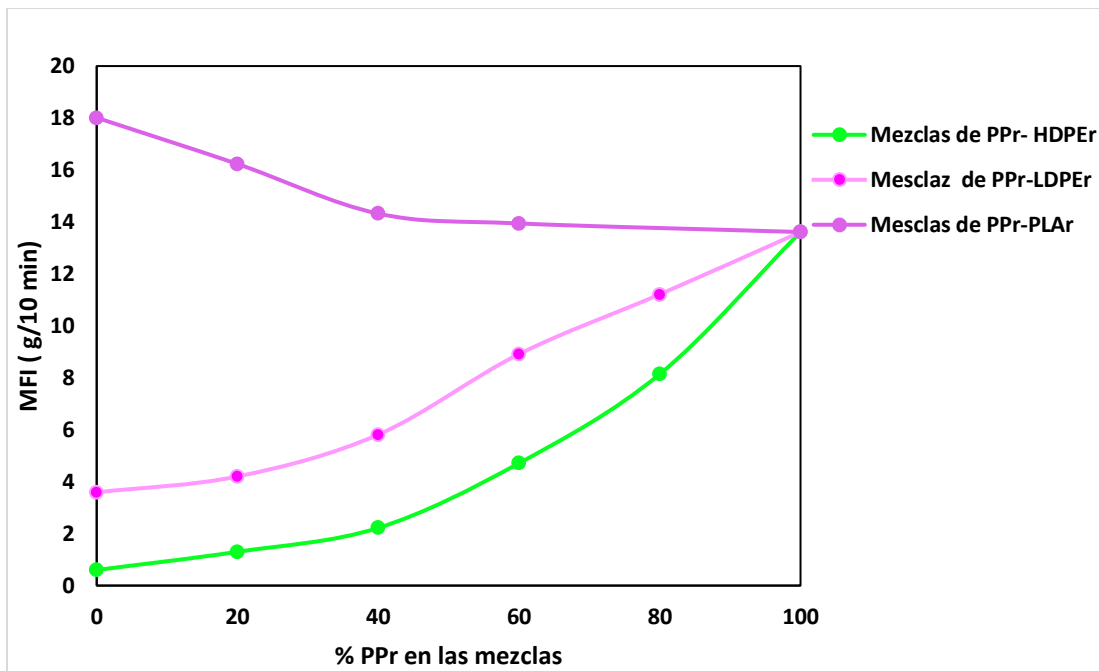


Fig. 38 Relación entre el valor de MFI de la mezcla y porcentaje de PPr.

Se observa que con el aumento del porcentaje en peso de PPr en las mezclas, el valor del MFI aumenta induciendo a una menor viscosidad. Lo que indica que el PPr presenta un efecto plastificante, siguiendo la definición de la IUPAC “un plastificante es una sustancia que se incorpora a un material plástico o elastómero para aumentar su flexibilidad y facilitar su transformación. Un plastificante puede reducir la viscosidad del fundido, rebajar la temperatura de transición vítrea o disminuir el módulo elástico del fundido” [54]. Esta característica mejora el procesamiento tanto para el HDPEr y LDPEr ya que con la adición del PPr, podría necesitar una menor temperatura para que el material presente fluidez, reduciendo de esta manera costos energéticos. Los extruidos de las mezclas mostraron el mismo aspecto con los materiales de partida, indicando la inmiscibilidad de las mezclas. En el caso de las mezclas de PPr- PLAr, el material que actúa como plastificante es el PLAr, ya que posee una menor viscosidad y genera en las mezclas un menor MFI con el aumento de su proporción.

*E. Resultados de las medidas de densidad**1) Análisis de los valores de densidad de la materia prima*

En la **TABLA XVII**, se observan los valores de densidad relativa para el PPr, HDPEr, LDPEr.

TABLA XVII
VALORES DE DENSIDAD DE LA MATERIA PRIMA Y DE LAS MEZCLAS

Muestra	Densidad (g/ cm^3)	% Cristalinidad
PP	$0,93 \pm 0,01$	29,38
HDPE 20%	$0,94 \pm 0,01$	30,44
HDPE40%	$0,94 \pm 0,02$	29,78
HDPE60%	$0,93 \pm 0,02$	27,84
HDPE 80%	$0,92 \pm 0,01$	35,75
HDPE	$0,88 \pm 0,01$	41,54
LDPE 20%	$0,94 \pm 0,02$	31,16
LDPE40%	$0,94 \pm 0,01$	30,15
LDPE60%	$0,95 \pm 0,01$	30,26
LDPE 80%	$0,95 \pm 0,02$	35,73
LDPE	$0,95 \pm 0,06$	40,22
PLA 20%	$0,98 \pm 0,02$	23,43
PLA 40%	$0,99 \pm 0,02$
PLA 60%	$1,08 \pm 0,03$
PLA	$1,25 \pm 0,10$	26,91

Cada una de estas densidades se encuentra o están muy cerca del rango de densidades para PO típicas que se hallan en los desechos plásticos del reciclaje mecánico ($0,9 \frac{g}{cm^3}$ - $0,96 \frac{g}{cm^3}$) mostradas en la **TABLA V**. Sin embargo, el intervalo de densidades para estos materiales posconsumo es muy amplio y no se ciñe con exactitud a los valores reportados por la bibliografía para los materiales puros. Hay que tener en cuenta que en los productos plásticos ya procesados suelen estar presentes cargas y aditivos que pueden variar la densidad. También, los valores de densidad para estos polímeros distan de los valores de densidad de la PO comerciales (**TABLA II** y **TABLA III**), ya que la densidad es una propiedad que depende de la cristalinidad, pérdida de plasticidad, absorción de algún solvente y de las degradaciones termoxidativas que pueden sufrir los materiales durante su reprocesamiento en el reciclaje mecánico. En cuanto a los filamentos de PLAr, se observó que el valor determinado para su densidad es acorde al reportado en la literatura (**TABLA IV**). También es importante mencionar que los valores de densidad determinados mediante la norma ASTM D322, se ven influenciados por las irregularidades o porosidades internas en los pellets del material.

2) Análisis de los valores de densidad de las mezclas

En la **TABLA XVII**, se puede evidenciar que la mezclas no presentan una variación significativa en el valor de densidad con la modificación en los porcentajes de cada componente. Sin embargo, se espera que las mezclas con mayor cristalinidad presenten una mayor densidad, ya que las zonas cristalinas presentan un elevado empaquetamiento de moléculas.

En la figura 39, se visualiza la relación la cristalinidad de las mezclas de PPr en HDPEr con los valores de densidad obtenidos (**Fig.39**).

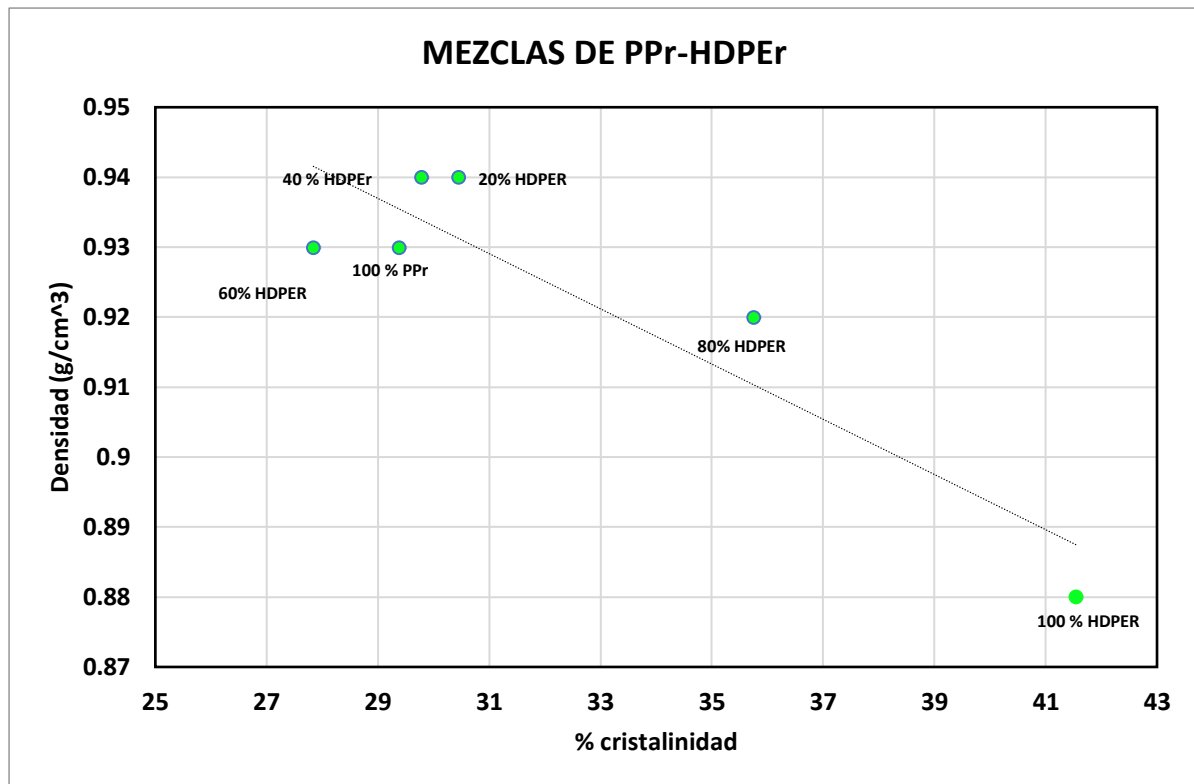


Fig. 39 Relación entre el valor de la densidad y porcentaje de cristalinidad en la mezcla PPr-HDPEr

Las primeras cuatro mezclas de PPr-HDPEr (hasta 60 % HDPEr), presentan el comportamiento esperado. Sin embargo, la mezcla con 80 % no siguen la misma tendencia, debido a la poca influencia que genera el PPr en la cristalinidad y el bajo valor de densidad para el HDPEr determinado.

En la figura 40, se muestra la relación de la cristalinidad de las mezclas de PPr en LDPEr con los valores de densidad obtenidos (**Fig.40**). Se observar que las mezclas exhiben una tendencia ascendente, donde las más cristalinas presentan mayor densidad. Sin embargo, debido a que las variaciones de los valores de densidad no son proporcionales a las variaciones del porcentaje de cristalinidad, podemos decir que para este tipo de mezclas no existe una fuerte relación entre la densidad y la cristalinidad, ya que esta propiedad también depende de otros factores anteriormente descritos.

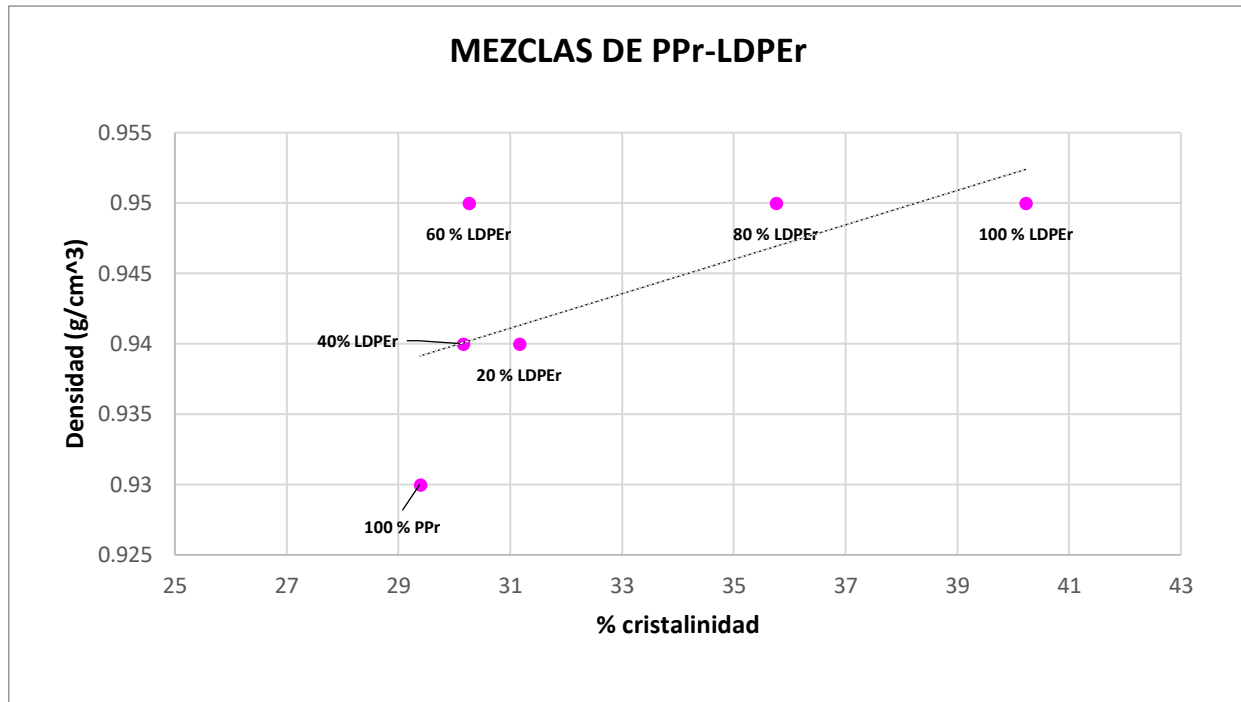


Fig. 40 Relación entre el valor de la densidad y porcentaje de cristalinidad en la mezcla PPr-LDPEr.

No se llevó a cabo la misma relación para las mezclas de PPr-PLAr, debido a que no se pudo determinar la cristalinidad de todas las mezclas sino solo a la del 20 % PLAr la cual exhibió un porcentaje de cristalinidad menor que el PPr. Aun así, se observa que con el aumento de PPr disminuye el valor de densidad de las mezclas, esto es debido a la baja densidad de PPr con respecto a la del PLAr.

F. Resultado de las medidas por SEM

1) Análisis SEM de la materia prima

En la figura 41, se observa imágenes SEM para cada una de las MPOr utilizadas (**Fig.41**). Estudios preliminares indican que la morfología de mezclas de polímeros está dada por las proporciones en sus componentes, la diferencia entre sus viscosidades y las condiciones del procesamiento de estos materiales. En las imágenes podemos observar una fase continua en todos los materiales, sin embargo, las superficies no son lisas, presentan deformaciones y defectos (rayones, micro fisuras, poros) asociados al proceso de extrusión y pelletizado. Las micrografías del PP, HDPE, LLDPE vírgenes generalmente muestran una superficie lisa[50][51][52]. Según un estudio sobre estos materiales, a medida que aumenta la cantidad de contaminantes, aditivos y degradación en el material, su morfología es cada vez más irregular. Lo que es de esperarse en estos materiales, ya que al ser MPOr traen consigo impurezas, aditivos y degradación por los ciclos térmicos a los que son sometidos durante el proceso de reciclaje mecánico. Estas irregularidades también son signo de la inmiscibilidad de los distintos componentes en el material[75]. En el caso del PLAr su morfología es más lisa que las del MPOr, y esto es debido a que no se encuentra mezclado con otro material; sin embargo, aun presenta rugosidad debido a los procesos térmicos en su procesamiento. Algo importante para destacar en estos resultados y relacionándolos con los resultados de MFI, observamos que a medida que aumenta el valor del MFI, implica una superficie más lisa, siendo el PPr y el PLAr el de mayor MFI, y el HDPEr el de menor. Este comportamiento puede relacionarse la viscosidad, ya que a un mayor MFI menor es la viscosidad, es decir, mayor será la tendencia a fluir creando una superficie con menos irregularidades.

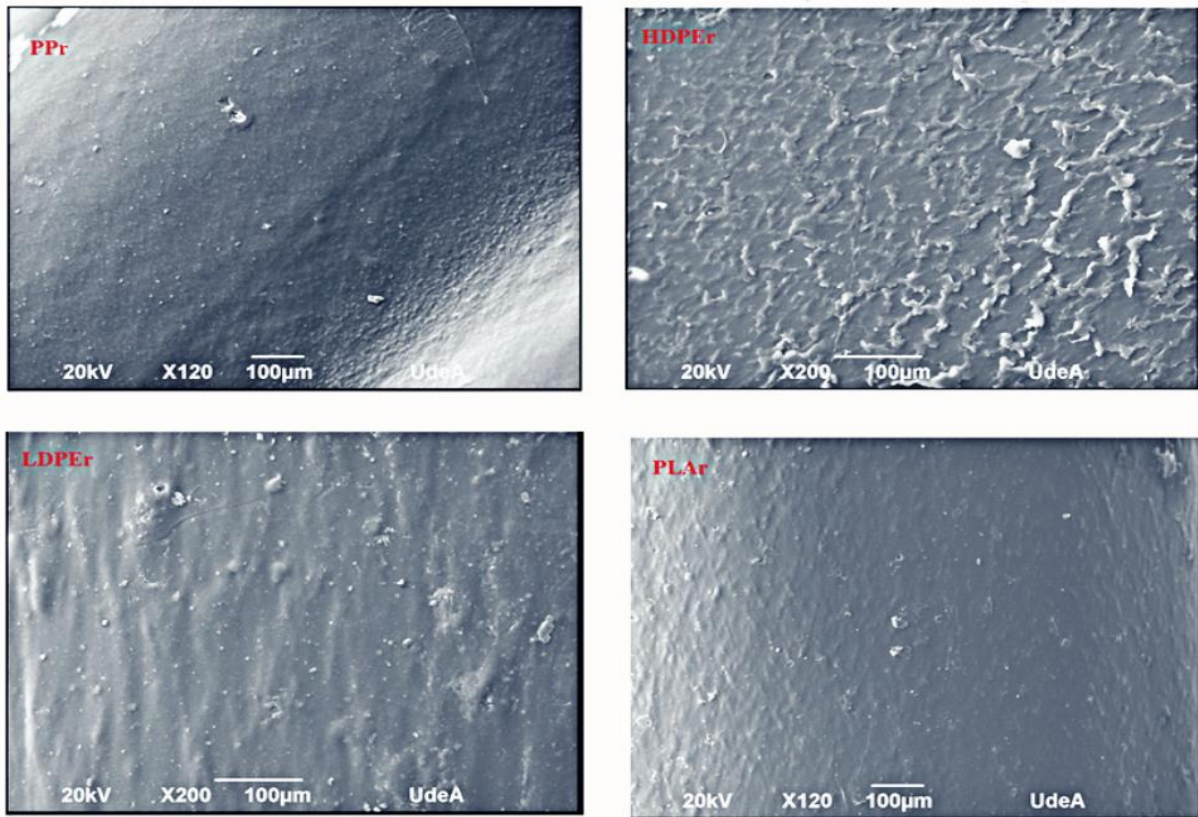


Fig. 41. Imágenes SEM de la superficie de las materias primas. a) PPr, b) HDPEr, c) LDPEr, d) PLAr.

2) Análisis de las micrografías SEM de las mezclas.

En las figuras 42 y 43, se observa las micrografías obtenidas para cada una de las mezclas (**Fig. 42** y **Fig.43**). Las micrografías de las superficies de las mezclas de PPr con HDPEr y LDPEr, se observa que a medida que disminuye el MFI, las superficies incrementan su rugosidad. Esto es debido, a que el aumento en la viscosidad impide una buena homogenización de las cadenas del fundido lo que provoca una superficie rugosa, además permite una mejor visualización de la dirección del flujo en aquellas que presentan menor viscosidad (vectores rojos).

Según estudios sobre mezclas de poliolefinas, estas mezclas presentan morfologías donde se distingue una fase continua y otra dispersa, siendo la fase continua el componente de mayor proporción o presentarse dos fases continuas en un mismo volumen, donde la composición de las

mezclas cumpla un papel decisivo en la forma en que se encuentre dispuesta las fases. Sin embargo, la identificación de tales fases y su estado dentro de la mezcla no fue posible visualizar debido a las limitaciones que se tienen con la técnica SEM, al no poder lograr un contraste para este tipo de sistemas con similitud química. Por tal motivo, para este tipo de mezclas es necesaria utilizar otra técnica de caracterización que permita la identificación entre las fases, ya que sus morfologías parecen acercarse a la continuidad de las fases [1].

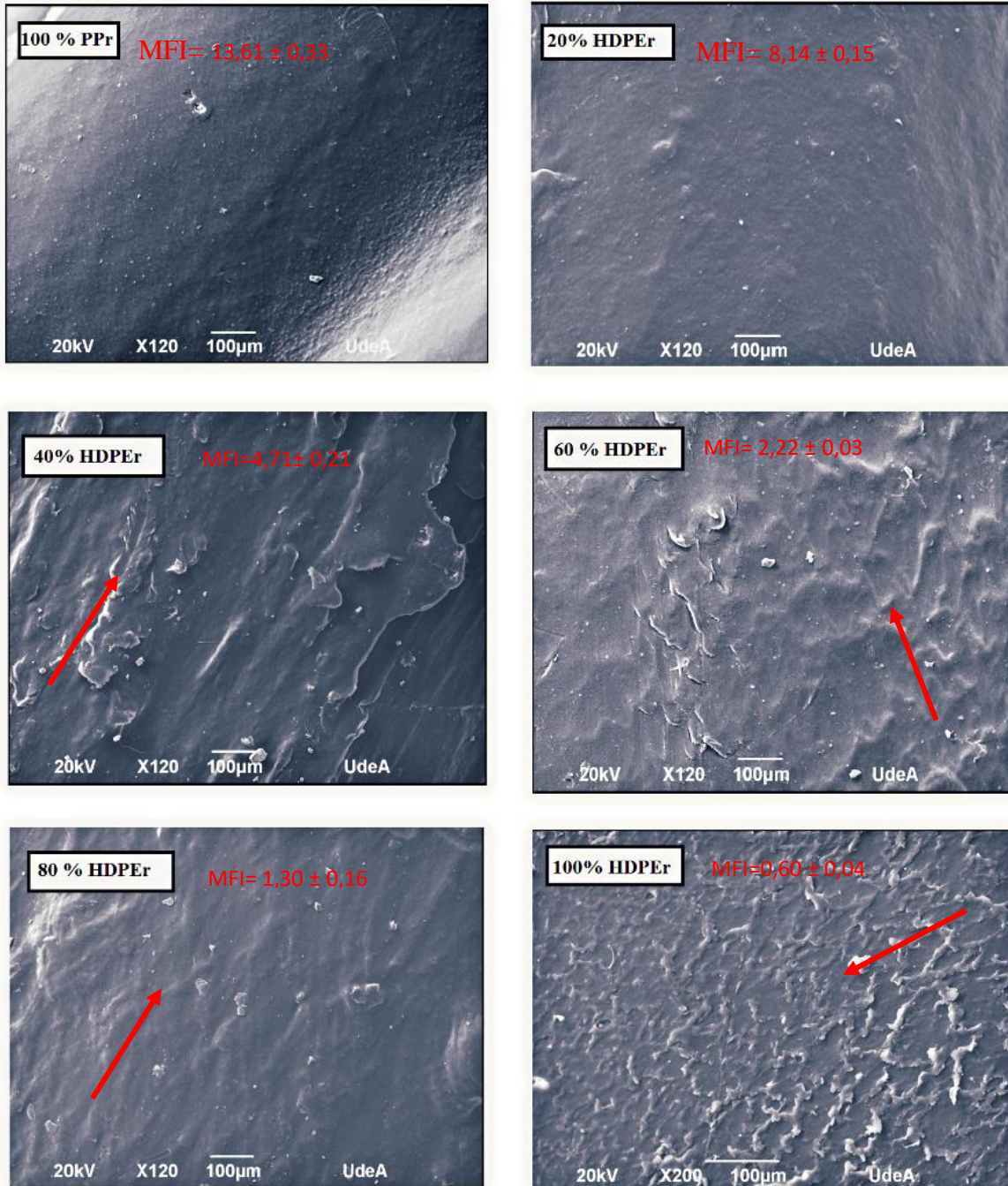


Fig. 42. Imágenes SEM de la superficie de las mezclas PPr-HDPEr.

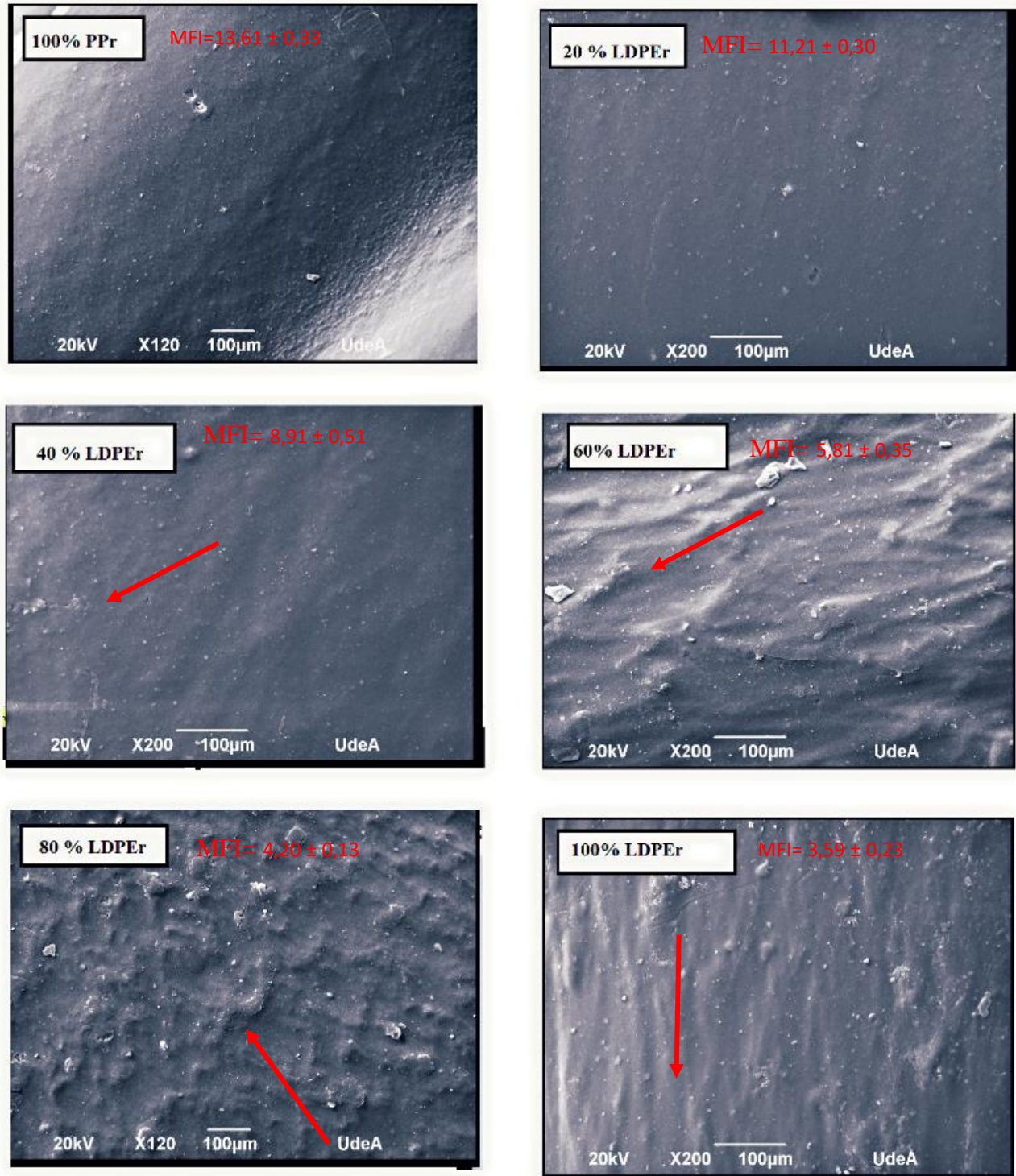


Fig. 43. Imágenes SEM de la superficie de las mezclas PPr-LDPEr.

En la siguiente figura se observa las micrografías para las mezclas de PPr-PLAr (**Fig.44**). Se observa claramente una morfología que consiste en una fase continua que corresponde al material de mayor proporción y una fase dispersa que concierne al material de menor proporción. La morfología que exhibe la mezcla con 20 % PLAr, se conoce en literatura como morfología matriz-gota, donde el componente de menor proporción está finamente disperso en forma de gotas, debido a la menor viscosidad que presenta en comparación a la matriz. Las propiedades que exhiben este tipo de morfología dependen en gran medida al tamaño de las gotas, unas partículas pequeñas generaran un material con muy buenas propiedades mecánicas como la resistencia al impacto. En la mezcla con 40 % PLAr, se evidencia una morfología que se entiende como morfología matriz-fibras, esta morfología es generada por la deformación de la fase dispersa, donde las gotas formadas empiezan a presentar la coalescencia. En literatura se informa que uno de los parámetros más influye en la formación de este tipo de estructuras es la relación de viscosidad. Cuando se tienen una relación baja se propicia el estiramiento de las gotas de la fase dispersa en dirección al flujo y esto se traduce en el mejoramiento de la resistencia de la mezcla en la misma dirección en que son formadas las fibras [1]. Sin embargo, en esta mezcla se puede apreciar que no existe buena adherencia entre la matriz y la fase dispersa, por los espacios vacíos que se encuentra entre ellas (señalados por los círculos naranjas). En la mezcla con 60 % de PLAr, se puede observar el mismo comportamiento de la mezcla anterior, pero las fibras son más alargadas, y se logra evidenciar una mejor adherencia entre la matriz (PLAr) y la fase dispersa (PPr).

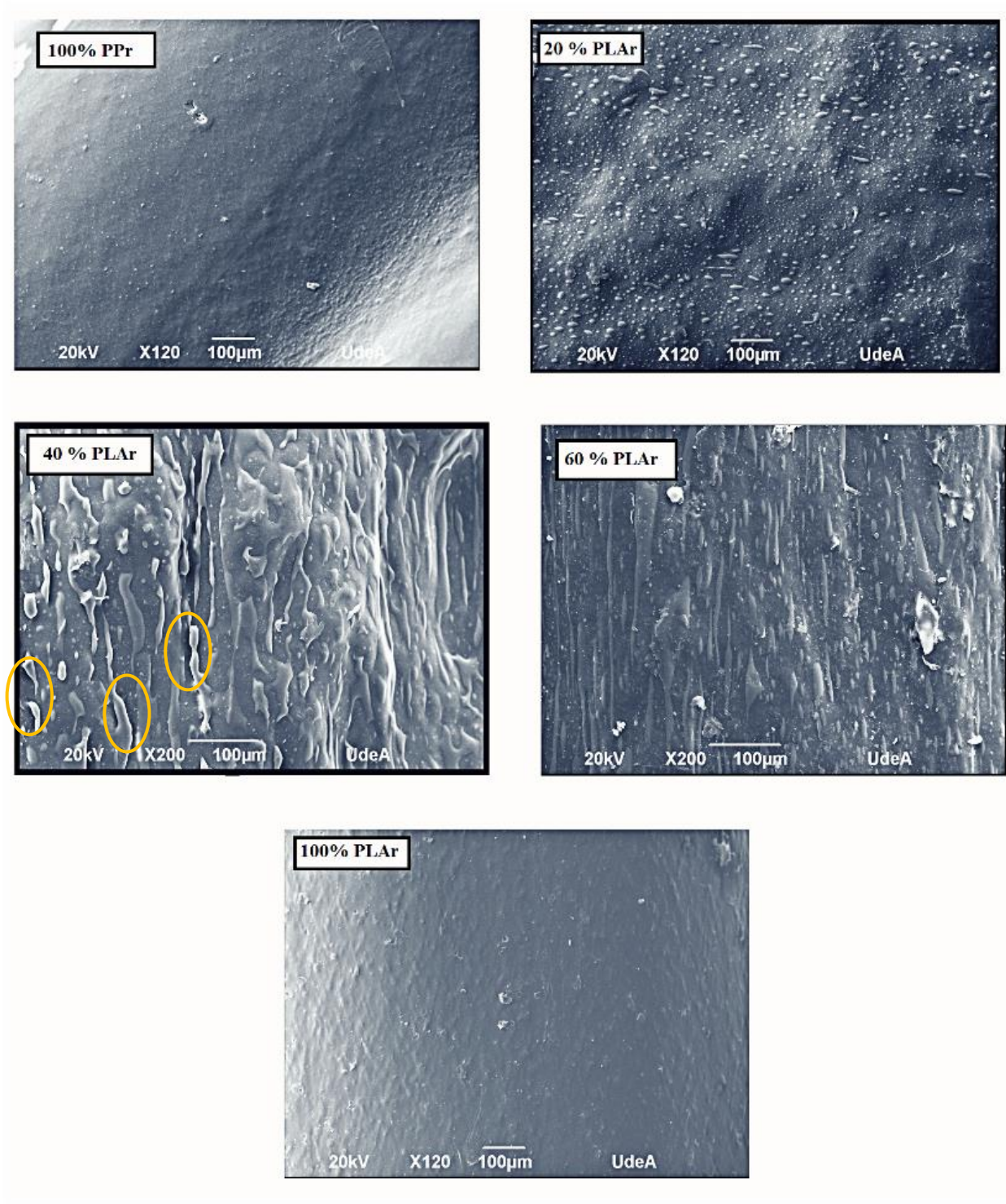


Fig. 44. Imágenes SEM de la superficie de las mezclas PPr-PLAr.

G. Resultados del ensayo de tensión

1) Probetas de tensión utilizadas

En la figura 45, se observa las probetas utilizadas para este ensayo de tensión (Fig. 45).

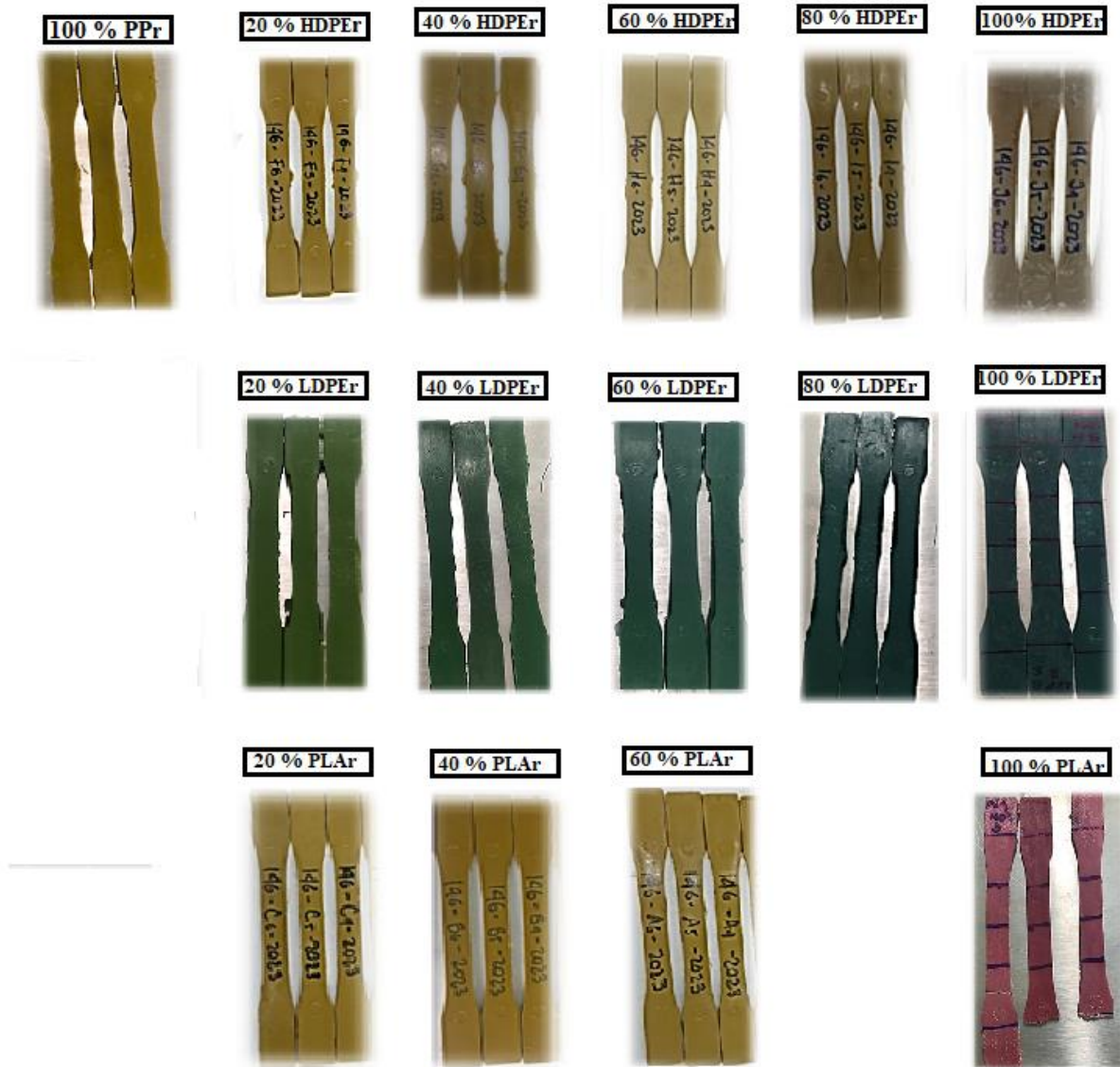


Fig. 45. probetas de tensión utilizadas.

Algunas probetas de PLAr fallaron antes de realizar el ensayo, debido a la fragilidad del material.

2) *Análisis del ensayo de tensión de la materia primas*

En **TABLA XVIII**, se resumen los resultados del ensayo de tensión.

TABLA XVIII
RESULTADOS DE ENSAYO DE TENSIÓN.

Muestra	Resistencia a la tensión [MPa]	Módulo elástico al 0,5 % de deformación [GPa]
PP	23,39 ± 0,62	1,82 ± 0,17
HDPEr 20%	16,21 ± 0,90	0,77 ± 0,10
HDPEr 40%	15,04 ± 0,25	1,13 ± 0,03
HDPE 60%	12,64 ± 0,10	0,75 ± 0,01
HDPE 80%	11,83 ± 0,29	0,57 ± 0,05
HDPE	11,45 ± 0,20	0,37 ± 0,02
LDPEr 20%	21,63 ± 0,73	0,97 ± 0,02
LDPEr 40%	17,17 ± 0,32	1,38 ± 0,07
LDPEr 60%	14,38 ± 0,75	0,66 ± 0,04
LDPEr 80%	11,68 ± 0,03	0,95 ± 0,1
LDPEr	9,96 ± 0,5	0,27 ± 0,02
PLAr 20%	16,37 ± 0,17	0,43 ± 0,12
PLAr 40%	12,70 ± 0,19	0,68 ± 0,19
PLAr 60%	10,35 ± 0,9	1,31 ± 0,10
PLA	9,33 ± 0,4	0,71 ± 0,06

En la figura 46, se pueden observar, las curvas características de esfuerzo-deformación de cada una de las materias primas (**Fig.46**). Los resultados obtenidos revelan que el PPr presenta propiedades mecánicas más elevadas en comparación con HDPEr, LDPEr y el ácido poliláctico (PLAr). Al relacionar estos resultados con la composición y estructura química de dichos materiales, es lógico suponer que el PPr posea propiedades mecánicas superiores debido a su estructura más rígida derivada de la presencia del sustituyente metilo (CH_3), el cual restringe la rotación de la cadena polimérica. Esta característica contribuye a una estructura más rígida y menos flexible. El HDPEr y LDPEr exhiben un comportamiento elástico con mayor capacidad de alargamiento debido a la mayor linealidad y flexibilidad de sus cadenas moleculares. No obstante, presentan una menor resistencia a la tracción en comparación con el PP.

También se puede observar que HDPEr y el LDPEr presentan un comportamiento mecánico similar, sin embargo, las propiedades mecánicas analizadas son un poco más elevadas en el HDPEr, y esto es debido a que HDPE presenta pocas cadenas laterales en comparación al LLDPE, lo que le permite una mayor cristalinidad, la cual influye en la rigidez del material.

Estudios anteriores han demostrado que la cristalinidad de un polímero es directamente proporcional a su rigidez e inversamente proporcional a su elasticidad; además que un mayor peso molecular implica una mayor resistencia a la tracción y mayor modulo elástico[76]. Esto es consecuente con los resultados obtenidos, ya que el HDPEr mostro mayor cristalinidad que el LDPEr, además de mostrar un menor MFI, lo que se infiere un mayor peso molecular. En cuanto al PLAr, es un material con una estructura compleja con dobles enlaces los cuales le otorgan una elevada rigidez.

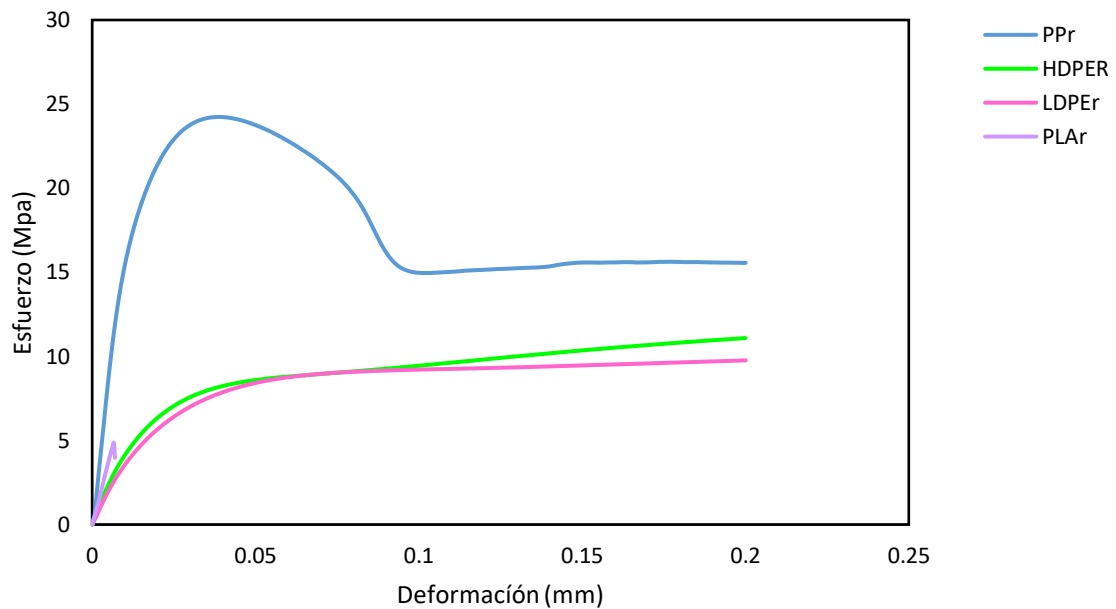


Fig. 46 Curvas esfuerzo-deformación de la materia prima.

3) Análisis del ensayo de tensión de las mezclas.

La Figura 47, muestra las curvas de esfuerzo deformación de las mezclas (**Fig. 47**). Y en la figura 48, se observa el efecto del contenido de PPr sobre el módulo de elasticidad y la resistencia a la tensión en las mezclas (**Fig.48**).

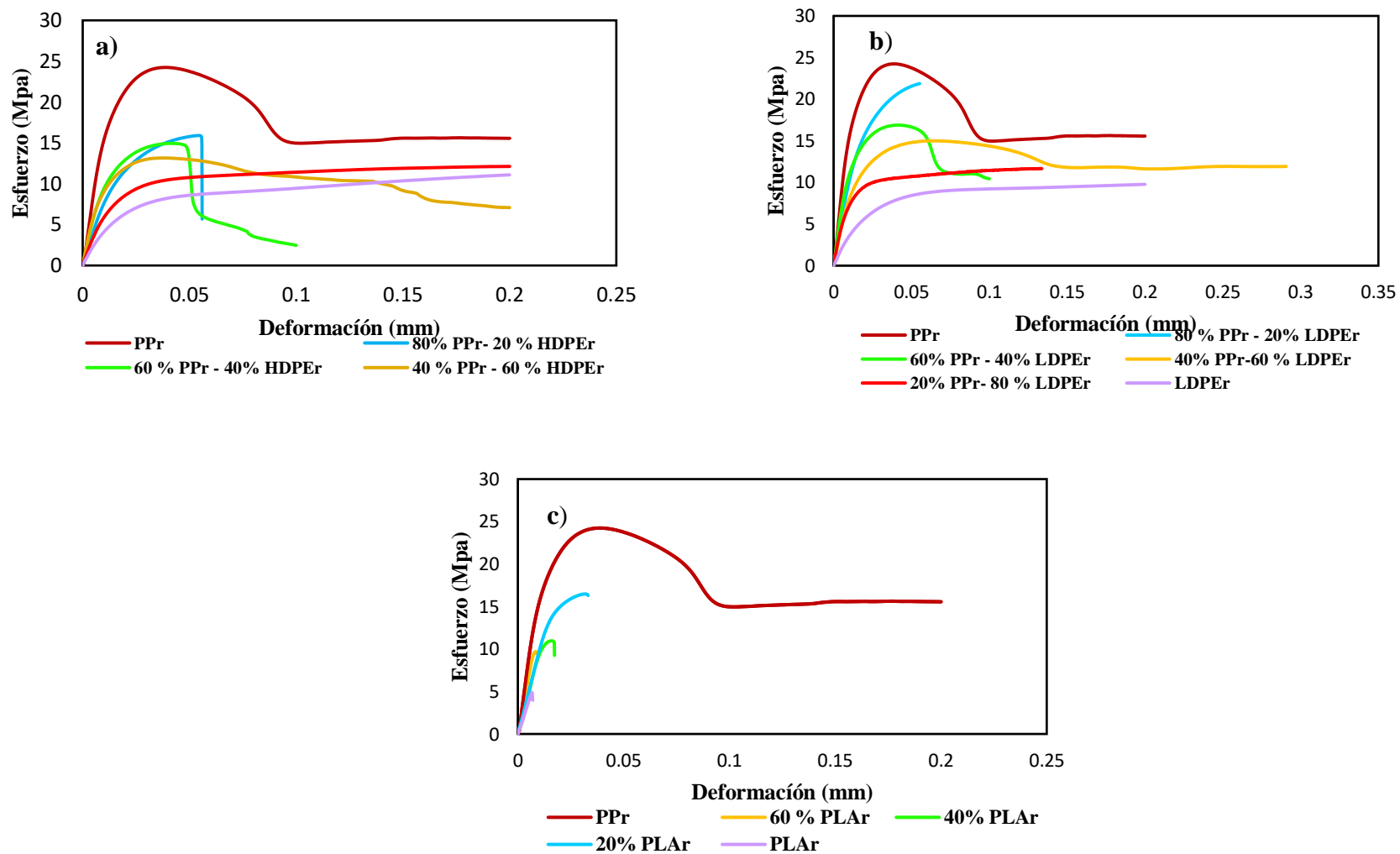


Fig. 47. Curvas esfuerzo-deformación. a) PPr-HDPEr, b) PPr-LDPEr, c) PPr-PLAr

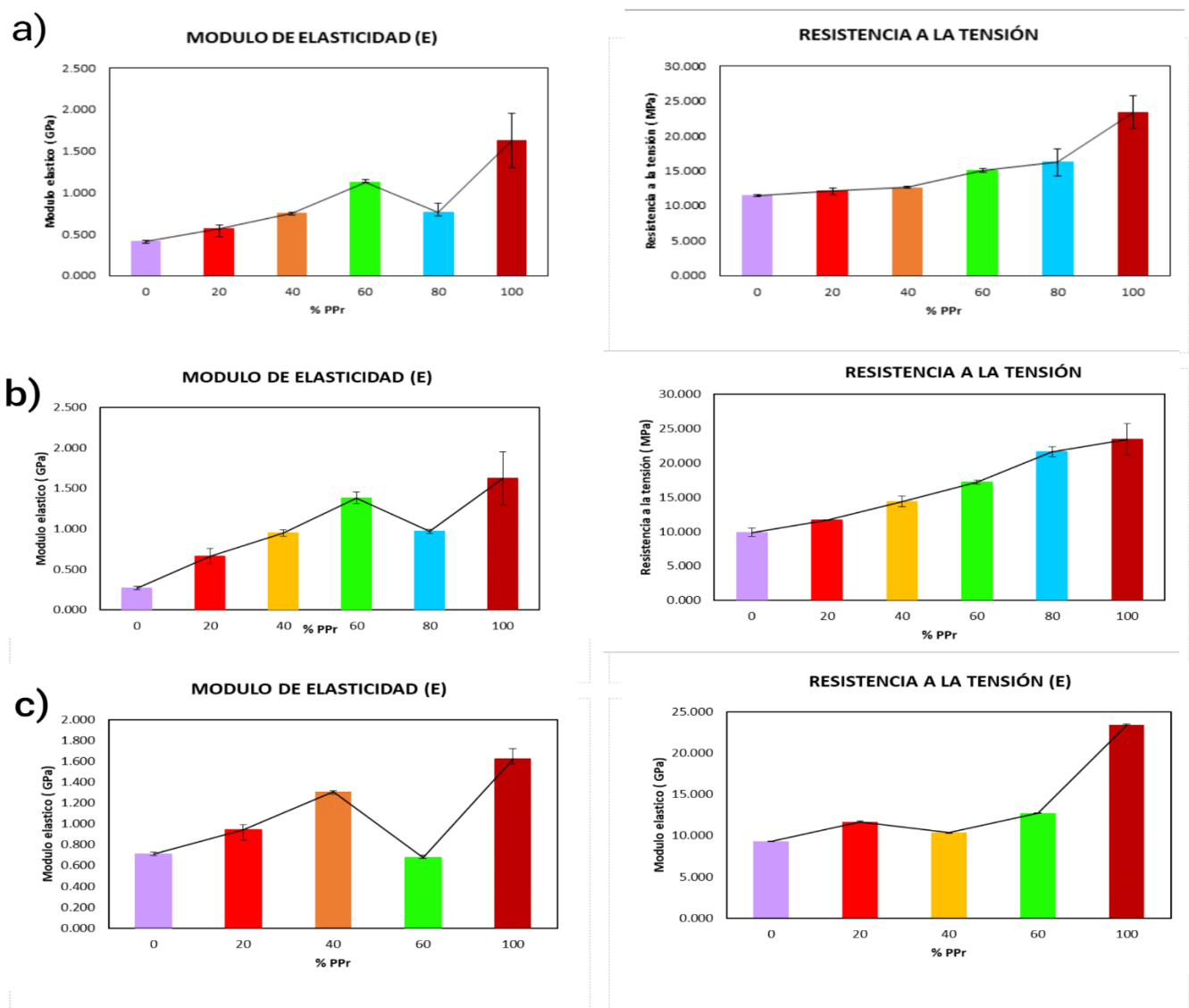


Fig. 48. Relación entre la composición PPr y la resistencia la tensión, módulo de elasticidad (E). Mezclas a) PPr-HDPEr, b) PPr-LDPEr, c) PPr-PLAr

En estudios preliminares se ha demostrado que el módulo de elasticidad o de tracción (E) de un polímero flexible se puede elevar agregando un polímero más rígido y además que un aumento en la E también puede ser causado por un aumento en la cristalinidad [76]. Por lo que se espera para este tipo de mezclas que el E aumente con el aumento de PPr, lo cual es consecuente con los resultados en las mezclas con 20 % PPr hasta 60 % PPr. Sin embargo, se evidencia un menor E en la mezcla con 80 % PPr, lo que sugiere una mala compatibilidad y una adhesión más débil entre las fases a estas proporciones. Un estudio previo sobre estos polímeros puros determinó que el PE puede desempeñar el papel de refuerzo o carga en la matriz de PP, lo cual depende de la distribución del PE y morfología de la mezcla [77]. Se encontró que la estructura de las mezclas con menos del 50% de PP consiste principalmente en redes rígidas de los dos polímeros, mientras que las mezclas de 50% PP o más se caracterizan por partículas de PE dispersas en una matriz de PP [71]. Debido a la inmiscibilidad del HDPEr y el PPr demostrado en el análisis de DSC, en la mezcla con % 80 PPr el PE actúa como carga. En cuanto al valor de la resistencia a la tensión de las mezclas, se logra evidenciar que el aumento de PPr en la mezcla aumenta la resistencia a la tensión debido a la alta resistencia del PPr. En el caso de las mezclas LDPEr con PPr, se observa el mismo comportamiento anterior, sin embargo, se presentan mayores valores tanto para la resistencia a la tensión como en el módulo de elasticidad a pesar del que LDPEr, presenta menores propiedades.

Es importante indicar que el estudio mecánico aquí descrito no fue relacionado con la morfología de la superficie de las mezclas, puesto que la similitud química entre los polímeros componentes no permitió lograr ninguna distinción o contraste entre las fases.

Para mezclas de PLAr-PPr, se observa que con el aumento de PPr en las mezclas, se presenta un aumento del módulo de elasticidad y resistencia a la tensión, lo cual es lo esperado debido a las altas propiedades del PPr en comparación al PLAr. Sin embargo, la mezcla con 60 % PLAr presenta menores propiedades, debido a la mala adherencia entre PLAr y PPr, visualizado mediante las imágenes SEM.

VIII. CONCLUSIONES

Mediante los espectros FTIR, se demostró que no existe un cambio en las interacciones intermoleculares del HDPEr, LDPEr y PLAr al ser mezclado con PPr. Y como resultado, no se identificaron modificaciones significativas en las bandas de absorción de los espectros en cada una de las mezclas analizadas. Sin embargo, se detectó degradación u oxidación en las mezclas, la cual puede ser atribuida al reprocesamiento y a la presencia de impurezas en los materiales de origen.

A través del uso de DSC, se pudo realizar un análisis del efecto de la composición en la miscibilidad de las mezclas estudiadas. En general se observó que dichas mezclas mostraron inmiscibilidad. Sin embargo, resulta notable que las mezclas que contienen un 20 % de PPr en HDPEr y LDPEr mostraron un único punto de cristalización, lo que podría indicar inmiscibilidad parcial. No obstante, es importante destacar que aún se requieren más estudios en pro de verificar y respaldar la hipótesis planteada.

En relación con los resultados obtenidos de las mediciones de MFI, se encontró que al incorporar PPr en HDPEr y en LDPEr, mejora el procesamiento de estos materiales. Esta mejora se debe a la reducción en la viscosidad del polímero, lo cual a su vez conduce a una disminución en la temperatura de procesamiento y en los costos energéticos asociados. Estos hallazgos indican claramente que la adición de PPr en estos materiales tiene un impacto positivo en la eficiencia y la economía en el proceso de producción.

Se demostró que la densidad en este tipo de mezclas no presenta variaciones significativas en relación con la composición de las mezclas, debido a las similitudes de los valores de densidad que presentaron los materiales de partida.

Mediante las micrografías SEM, se mostró la relación entre la viscosidad y morfología superficial de las muestras. Entre mayor viscosidad más irregular es la superficie; no se logró evidenciar diferencias de fases en las mezclas a pesar de ser inmiscibles, debido a las características similares que presentan los materiales de partida, por lo que es necesario hacer cortes transversales criogénicamente para visualizar mejor estas fases.

Los ensayos de tensión revelaron que, a pesar de que las mezclas son inmiscibles, el PPr mejora las propiedades mecánicas analizadas del HDPEr, LDPEr y PLAr. Se logró observar que el incremento de PPr en las mezclas conlleva un aumento tanto en el módulo de elasticidad como en la resistencia a la tensión de los demás materiales. Es importante destacar que las mezclas que contienen un 80% de PPr en HDPEr, y en LDPEr, así como un 60% de PPr en PLAr, demostraron tener propiedades inferiores en comparación con las demás mezclas. Estos resultados indican que a mayores proporciones de PPr conlleva un efecto perjudicial en las propiedades de las mezclas.

VIII. RECOMENDACIONES

Resulta interesante realizar la observación de las estructuras cristalinas y la morfología de los materiales de partida, y mezclas a través del uso del microscopio óptico polarizado. Este procedimiento ayudará a obtener un mayor entendimiento sobre el comportamiento térmico y mecánico de dichos materiales, dado que el tamaño de los cristales y su morfología ejercen una influencia significativa en estos aspectos. Cabe destacar, que dicho procedimiento se realizará en investigaciones futuras. Asimismo, resulta imprescindible llevar a cabo el corte criogénico de las muestras con el fin de analizarlas mediante el microscopio electrónico de barrido (SEM), lo cual permitirá una mejor visualización de las distintas fases presentes en las mezclas.

REFERENCIAS

- [1] L. GONZÁLEZ, “Mezclas multicomponentes de poliolefinas/ps sin compatibilizar: reología, procesamiento y caracterización morfológica y mecánica”, Universidad EAFIT, 2012.
- [2] A. S. Elgharbawy y R. M. Ali, “A comprehensive review of the polyolefin composites and their properties”, *Heliyon*, vol. 8, núm. 7, p. e09932, jul. 2022, doi: 10.1016/J.HELIYON.2022.E09932.
- [3] “Global Plastics Outlook”, *Glob. Plast. Outlook*, jun. 2022, doi: 10.1787/AA1EDF33-EN.
- [4] D. Charles y L. Kimman, “Plastic Waste Makers Index 2023”. Minderoo Foundation, feb. 06, 2023.
- [5] “PEC 2022”. <https://acoplasticos.org/DirectorioColombiano/2022/PEC-2022/90/> (consultado mar. 29, 2023).
- [6] PLASTICS EUROPE, “Plásticos – Situación en 2022”, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://plasticseurope.org/es/wp-content/uploads/sites/4/2023/02/PLASTICOS-SITUACION-2022-esp.pdf>.
- [7] D. W. Posch, “Polyolefins”, en *Applied Plastics Engineering Handbook*, Elsevier, 2017, pp. 27–53.
- [8] Johovani Misael Suarez Luna, “Diseño sustentable de una impresora 3d para Polvos abs reciclados”, 2015.
- [9] V. Nagarajan, A. K. Mohanty, y M. Misra, “Perspective on Polylactic Acid (PLA) based Sustainable Materials for Durable Applications: Focus on Toughness and Heat Resistance”, *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 4, núm. 6, pp. 2899–2916, jun. 2016, doi: 10.1021/ACSSUSCHEMENG.6B00321/ASSET/IMAGES/LARGE/SC-2016-00321X_0014.JPEG.
- [10] “SUCCESS STORY: CREATING A CLOSED LOOP SUPPLY CHAIN FOR 3D PRINTING FILAMENTS”, Consultado: ene. 09, 2024. [En línea]. Disponible en: www.hssmi.org.
- [11] A. Rahimi y J. M. García, “Chemical recycling of waste plastics for new materials production”, *Nat. Rev. Chem.*, vol. 1, núm. 6, p. 0046, jun. 2017, doi: 10.1038/s41570-017-0046.
- [12] I. Vollmer *et al.*, “Beyond Mechanical Recycling: Giving New Life to Plastic Waste”,

- Angew. Chemie Int. Ed.*, vol. 59, núm. 36, pp. 15402–15423, sep. 2020, doi: 10.1002/anie.201915651.
- [13] H. Karan, C. Funk, M. Grabert, M. Oey, y B. Hankamer, “Green Bioplastics as Part of a Circular Bioeconomy”, *Trends Plant Sci.*, vol. 24, núm. 3, pp. 237–249, mar. 2019, doi: 10.1016/j.tplants.2018.11.010.
- [14] K. Ragaert, L. Delva, y K. Van Geem, “Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste”, *Waste Manag.*, vol. 69, pp. 24–58, nov. 2017, doi: 10.1016/j.wasman.2017.07.044.
- [15] Z. O. G. Schyns y M. P. Shaver, “Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review”, *Macromol. Rapid Commun.*, vol. 42, núm. 3, feb. 2021, doi: 10.1002/marc.202000415.
- [16] R. et al. De Smet, M., Linder, M., Koopmans, *European Commission, Directorate-General for Research and Innovation*, . .
- [17] R. Greco, G. Mucciariello, G. Ragosta, y E. Martuscelli, “Properties of polyethylene-polypropylene blends”, *J. Mater. Sci.*, vol. 15, núm. 4, pp. 845–853, abr. 1980, doi: 10.1007/BF00552093.
- [18] N. Kukaleva, G. P. Simon, y E. Kosior, “Binary and ternary blends of recycled high-density polyethylene containing polypropylenes”, *Polym. Eng. Sci.*, vol. 43, núm. 2, pp. 431–443, feb. 2003, doi: 10.1002/pen.10035.
- [19] A. Van Belle *et al.*, “Microstructural Contributions of Different Polyolefins to the Deformation Mechanisms of Their Binary Blends”, *Polymers (Basel)*, vol. 12, núm. 5, p. 1171, may 2020, doi: 10.3390/polym12051171.
- [20] A. A. Al-Juhani y M. A. Suleiman, “Study of the Effect of EPDM Structure on the Compatibility of PP/LDPE Blends”, *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 37, núm. 4, pp. 863–875, jun. 2012, doi: 10.1007/s13369-012-0231-4.
- [21] S. Vervoort *et al.*, “Compatibilization of polypropylene–polyethylene blends”, *Polym. Eng. Sci.*, vol. 58, núm. 4, pp. 460–465, abr. 2018, doi: 10.1002/pen.24661.
- [22] A. Scoppio, D. Cavallo, A. J. Müller, y D. Tranchida, “Temperature modulated DSC for composition analysis of recycled polyolefin blends”, *Polym. Test.*, vol. 113, p. 107656, sep. 2022, doi: 10.1016/j.polymertesting.2022.107656.
- [23] S. M. Al-Salem, P. Lettieri, y J. Baeyens, “Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review”, *Waste Manag.*, vol. 29, núm. 10, pp. 2625–2643, oct. 2009, doi: 10.1016/j.wasman.2009.06.004.

- [24] “Plásticos compostables de origen vegetal van a parar a vertederos - BBC News”. <https://www.bbc.com/news/uk-wales-47238220> (consultado ene. 09, 2024).
- [25] ASTM D883-22, “Standard Terminology Relating to Plastics”, doi: 10.1520/D0883-00.
- [26] M. Beltrán y A. Marcilla, “Tecnología de Polímeros.”
- [27] “POLÍMEROS”. <https://www.equiposylaboratorio.com/portal/articulo-ampliado/polimeros> (consultado feb. 19, 2024).
- [28] “Los polímeros | Tecnología de los Plásticos”. <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2013/08/polimeros.html> (consultado feb. 19, 2024).
- [29] P. S. Chum y K. W. Swogger, “Olefin polymer technologies—History and recent progress at The Dow Chemical Company”, *Prog. Polym. Sci.*, vol. 33, núm. 8, pp. 797–819, ago. 2008, doi: 10.1016/j.progpolymsci.2008.05.003.
- [30] V. Ojijo y E. Sadiku, *Improving wear resistance of polyolefins*, in: *Polyolefin Fibres*. 2017.
- [31] N. GUTIERREZ, “CARACTERIZACIÓN DEL POLIPROPILENO RECICLADO DISPONIBLE A PARTIR DE TAPAS, PARA REINCORPORARLO EN PROCESOS PRODUCTIVOS, MEZCLADO CON POLIPROPILENO VIRGEN”.
- [32] E. Carmeli, “Crystallization behaviour of recycled polyolefins blends.”
- [33] DIN 16774-1, “Plastic moulding materials; polypropylene and propylene copolymer thermoplastics; classification and designation”.
- [34] Hisham A. Maddah, “Polypropylene as a Promising Plastic: A Review”, doi: 10.5923/j.ajps.20160601.01.
- [35] P. N. Khanam y M. A. A. AlMaadeed, “Processing and characterization of polyethylene-based composites”, *Adv. Manuf. Polym. Compos. Sci.*, vol. 1, núm. 2, pp. 63–79, abr. 2015, doi: 10.1179/2055035915Y.0000000002.
- [36] “Overview of materials for Very Low Density Polyethylene (VLDPE)”. <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=e8da5fa318ea4eafaa33fb386457e999> (consultado ene. 19, 2024).
- [37] “Estructura espacial de los dos isómeros del ácido láctico | Download Scientific Diagram”. https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Estructura-espacial-de-los-dos-isomeros-del-acido-lactico_fig2_316281284 (consultado ene. 19, 2024).
- [38] “Ácido polilactico Producción y Propiedades”. https://hmong.es/wiki/Polylactic_acid

- (consultado mar. 04, 2024).
- [39] M. A. AlMa'adeed y I. Krupa, "Polyolefin Compounds and Materials, Fundamental and Industrial Applications", Qatar.
- [40] D. Jubinville, E. Esmizadeh, S. Saikrishnan, C. Tzoganakis, y T. Mekonnen, "A comprehensive review of global production and recycling methods of polyolefin (PO) based products and their post-recycling applications", *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 25, sep. 2020, doi: 10.1016/J.SUSMAT.2020.E00188.
- [41] N. Singh, D. Hui, R. Singh, I. P. S. Ahuja, L. Feo, y F. Fraternali, "Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications", *Compos. Part B Eng.*, vol. 115, pp. 409–422, abr. 2017, doi: 10.1016/j.compositesb.2016.09.013.
- [42] ROYAL SOCIETY OF CHEMISTRY, "Mechanical recycling", 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.rsc.org/globalassets/22-new-perspectives/sustainability/progressive-plastics/explainers/rsc-explainer-5---mechanical-recycling.pdf>.
- [43] S. Yin, R. Tuladhar, F. Shi, R. A. Shanks, M. Combe, y T. Collister, "Mechanical reprocessing of polyolefin waste: A review", *Polym. Eng. Sci.*, vol. 55, núm. 12, pp. 2899–2909, dic. 2015, doi: 10.1002/pen.24182.
- [44] D. Maga, M. Hiebel, y N. Thonemann, "Life cycle assessment of recycling options for polylactic acid", *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 149, pp. 86–96, oct. 2019, doi: 10.1016/j.resconrec.2019.05.018.
- [45] J. Runt y J. Huang, "Polymer blends and copolymers", 2002, pp. 273–294.
- [46] V. GONZALEZ, "MEZCLAS DE POLIMEROS CON INTERACCIONES ESPECIFICAS."
- [47] SANDER ANDERSON OTERO CÁRDENAS, "PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA Y TÉRMICA DE MEZCLAS BINARIAS DE POLICAPROLACTONA (PCL) Y RESINA DE MOPA-MOPA (elaecagia pastoensis mora)", 2011.
- [48] W. F. Yong y H. Zhang, "Recent advances in polymer blend membranes for gas separation and pervaporation", *Prog. Mater. Sci.*, vol. 116, p. 100713, feb. 2021, doi: 10.1016/j.pmatsci.2020.100713.
- [49] C. Rosales, "ESTRATEGIAS PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO

- MECÁNICO DE MEZCLAS DE POLIPROPILENO Y POLIETILENO RECICLADOS”, INTEMA, 2020.
- [50] J. C. Cañadas Lorenzo, “ESTUDIO DEL EFECTO DE LA CRISTALIZACIÓN FRÍA Y DEL ENVEJECIMIENTO FÍSICO EN LAS RELAJACIONES DE LOS POLÍMEROS MEDIANTE LA TÉCNICA DE CORRIENTES ESTIMULADAS TÉRMICAMENTE”, UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA.
- [51] “Cristalinidad / Grado de Cristalinidad - NETZSCH Analyzing & Testing”. <https://analyzing-testing.netzsch.com/es/training-know-how/glosario/cristalinidad-grado-de-cristalinidad> (consultado feb. 19, 2024).
- [52] E. Karaagac, M. P. Jones, T. Koch, y V.-M. Archodoulaki, “Polypropylene Contamination in Post-Consumer Polyolefin Waste: Characterisation, Consequences and Compatibilisation”, *Polymers (Basel)*, vol. 13, núm. 16, p. 2618, ago. 2021, doi: 10.3390/polym13162618.
- [53] ASTM D1238, “standard test method for melt flow rates of thermoplastics by extrusion plastometer”, doi: 10.1520/D1238-10.
- [54] M. BELTRAN, *TECNOLOGIA DE POLIMEROS*. 2012.
- [55] ASTM D792-20, “Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement”, doi: 10.1520/D0792-20.
- [56] Universidad de Antioquia, “Microscopio electrónico de barrido (SEM)”. https://www.udea.edu.co/wps/portal/udea/web/inicio/unidades-academicas/ciencias-exactas-naturales/estudiar-facultad/posgrados/doctorado-ciencias-quimicas/!ut/p/z1/jZDNDolwEISfxSfo9odCj_w0pIUUCiLYi-FESBQ9GJ9fY-IFY2Vvm3wzs7PIoQG5ZXzM03ifr8t4fu1Hx0_GBhKTFMqI.
- [57] ASTM D638-14, “Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics”, doi: 10.1520/D0638-14.
- [58] J. Fang, L. Zhang, D. Sutton, X. Wang, y T. Lin, “Needleless Melt-Electrospinning of Polypropylene Nanofibres”, *J. Nanomater.*, vol. 2012, pp. 1–9, 2012, doi: 10.1155/2012/382639.
- [59] A. Ramirez, M. Valera, A. Aparicio, y J. Conde, “COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE PELÍCULAS DE ALMIDÓN DE PLÁTANO CON POLI(ETILENO TEREFTALATO) DEGRADADO.” *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 14, no. 2 (2015):513-521.

- Redalyc, <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62041194027>”, *Rev. Mex. Ing. Quim.*, 2015.
- [60] “IR Tables.pdf - Beauchamp Spectroscopy Tables 3 units = cm-1 4000 2500 3000 3500 sp C-H stretch 1700 2000 C C sp3 C-H stretch thiol S-H stretch sp2 | Course Hero”. <https://www.coursehero.com/file/97486143/IR-Tablespdf/> (consultado feb. 05, 2024).
- [61] A. Azmi, K. Y. Lau, N. A. Ahmad, Z. Abdul-Malek, y W. A. W. A. Rahman, “Thermal and Breakdown Properties of Polypropylene Homopolymer, Copolymer, and Blend”, en *2018 IEEE 7th International Conference on Power and Energy (PECon)*, dic. 2018, pp. 107–110, doi: 10.1109/PECON.2018.8684178.
- [62] V. Godoy, M. Martín, M. Calero, y J. A. Moreno, “Analysis of Commercial Polyethylene Bags as a Prior Step to their Mechanical Recycling: A case Study in Granada, Spain”.
- [63] D. C. J. C. V.-I. MSc. Pablo A. Rodríguez-Bruceta, Dr. C. Ángel T. Pérez-Rodríguez, “Propuesta de un procedimiento para el reciclado del polietileno de alta densidad”, 2015.
- [64] C. Gartner, J. D. Sierra, y R. Avakian, “New polyolefins characterization by instrumental analysis”, en *Metallocen Technology*, 1999.
- [65] F. R. Passador, A. C. Ruvolo Filho, y L. A. Pessan, “Caracterização estrutural de nanocompósitos de blendas HDPE/LLDPE e OMMT obtidos por diferentes sequências de mistura”, *Polímeros*, vol. 22, núm. 4, pp. 357–363, ago. 2012, doi: 10.1590/S0104-14282012005000052.
- [66] “Metallocene Technology in Commercial Applications - George Benedikt - Google Libros”. <https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=DnYUYa1vi5AC&oi=fnd&pg=PA183&dq=NEW+POLYOLEFINS+CHARACTERIZATION+BY%0D%0A%0D%0AINSTRUMENTAL+ANALYSIS.&ots=tUU6XdheyB&sig=yxseV1XUkoIbVn8eA2r3KjeaHbc#v=onepage&q=NEW+POLYOLEFINS+CHARACTERIZATION+BY+INSTRUMENTAL+ANALYSIS.&f=false> (consultado feb. 06, 2024).
- [67] M. A. Cuiffo, J. Snyder, A. M. Elliott, N. Romero, S. Kannan, y G. P. Halada, “Impact of the Fused Deposition (FDM) Printing Process on Polylactic Acid (PLA) Chemistry and Structure”, *Appl. Sci.*, vol. 7, núm. 6, p. 579, jun. 2017, doi: 10.3390/app7060579.
- [68] J.-H. Lin *et al.*, “Preparation and Compatibility Evaluation of Polypropylene/High Density Polyethylene Polyblends”, *Materials (Basel)*, vol. 8, núm. 12, pp. 8850–8859, dic. 2015, doi: 10.3390/ma8125496.

- [69] H. Sutar *et al.*, “Mechanical, Thermal and Crystallization Properties of Polypropylene (PP) Reinforced Composites with High Density Polyethylene (HDPE) as Matrix”, *Mater. Sci. Appl.*, vol. 09, núm. 05, pp. 502–515, 2018, doi: 10.4236/msa.2018.95035.
- [70] M. Safandowska, A. Rozanski, y A. Galeski, “Plasticization of Polylactide after Solidification: An Effectiveness and Utilization for Correct Interpretation of Thermal Properties”, *Polymers (Basel)*., vol. 12, núm. 3, p. 561, mar. 2020, doi: 10.3390/polym12030561.
- [71] C. Aumnate, N. Rudolph, y M. Sarmadi, “Recycling of Polypropylene/Polyethylene Blends: Effect of Chain Structure on the Crystallization Behaviors”, *Polymers (Basel)*., vol. 11, núm. 9, p. 1456, sep. 2019, doi: 10.3390/polym11091456.
- [72] S. Wang, L. Capoen, D. R. D’hooge, y L. Cardon, “Can the melt flow index be used to predict the success of fused deposition modelling of commercial poly(lactic acid) filaments into 3D printed materials?”, *Plast. Rubber Compos.*, vol. 47, núm. 1, pp. 9–16, ene. 2018, doi: 10.1080/14658011.2017.1397308.
- [73] S. Wang *et al.*, “Lifting the quality of fused filament fabrication of polylactic acid based composites”, *Compos. Part B Eng.*, vol. 210, p. 108613, abr. 2021, doi: 10.1016/j.compositesb.2021.108613.
- [74] D. S. Rosa, C. G. F. Guedes, y C. L. Carvalho, “Processing and thermal, mechanical and morphological characterization of post-consumer polyolefins/thermoplastic starch blends”, *J. Mater. Sci.*, vol. 42, núm. 2, pp. 551–557, ene. 2007, doi: 10.1007/s10853-006-1049-9.
- [75] S. M. Al-Salem *et al.*, “Study of the degradation profile for virgin linear low-density polyethylene (LLDPE) and polyolefin (PO) plastic waste blends”, *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 21, núm. 5, pp. 1106–1122, sep. 2019, doi: 10.1007/s10163-019-00868-8.
- [76] S. Humbert, O. Lame, R. Séguéla, y G. Vigier, “A re-examination of the elastic modulus dependence on crystallinity in semi-crystalline polymers”, *Polymer (Guildf)*., vol. 52, núm. 21, pp. 4899–4909, sep. 2011, doi: 10.1016/j.polymer.2011.07.060.
- [77] E. Karaagac, “Blends of post-consumer recycled polypropylene (PP)/polyethylene (PE): rheology, morphology, and mechanics”.