



EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE MEZCLAS BINARIAS DE POLIOLEFINAS MIXTAS Y PLA POSCONSUMO CON POLIPROPILENO RECICLADO

D. L. Pérez^{1,}, C. Gartner^{2,*}*

1: Universidad de Antioquia - Facultad de ingeniería

2: Grupo de Investigación Ciencia De Los Materiales, Sede de Investigación Universitaria, SIU, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

* dianal.perez@udea.edu.co, carmina.gartner@udea.edu.co

PALABRAS CLAVE	RESUMEN
Reciclaje, mezclas de poliolefinas mixtas, compatibilidad, PLA.	Las poliolefinas constituyen una gran proporción del alto flujo de polímeros posconsumo. Debido a sus propiedades químicas y físicas similares se dificulta su recolección y clasificación diferenciada, por lo cual es común que se mezclen durante los procesos de reciclaje, razón por la cual se denominan poliolefinas mixtas recicladas. Por esta razón es importante obtener información acerca de su comportamiento térmico, reológico y mecánico y estudiar como varían estas propiedades en sus mezclas, lo que servirá para predecir su desempeño posterior y su estandarización técnica, facilitando el proceso de reciclaje. Es así como el objetivo de este trabajo es estudiar las propiedades de mezclas binarias de polipropileno reciclado con poliolefinas mixtas recicladas, específicamente polietileno de alta densidad y polietileno de baja densidad reciclados en diferentes proporciones, sin usar agentes compatibilizantes. Además, se estudian mezclas de polipropileno reciclado con ácido poliláctico reciclado, como una alternativa para los desechos de la impresión 3D, un método de procesamiento muy común para este polímero. Las mezclas binarias se realizaron en proporciones de 20, 40, 60 y 80 % en peso usando una extrusora de doble husillo y las propiedades de cada mezcla fueron determinadas por espectroscopía infrarroja, calorimetría diferencial de barrido, medidas del índice de fluidez y pruebas de tracción. Los resultados revelaron que, aunque si bien no había miscibilidad, las mezclas con polietileno exhibieron un aumento gradual de la resistencia a la tracción con la adición de polipropileno reciclado.

EVALUATION OF THE PROPERTIES ON BINARY BLENDS OF POST-CONSUMER MIXED POLYMERS WITH RECYCLED POLYPROPYLENE

KEYWORDS	ABSTRACT
Recycling, polyolefin blends, compatibility, PLA.	Polyolefins make up a large proportion of the great post-consumer polymer stream. Due to their similar chemical and physical properties, it is difficult to collect and sort them separately, so it is common for them to be mixed during recycling processes, which is why they are called mixed recycled polyolefins. For this reason, it is important to obtain information about their thermal, rheological and mechanical behavior and to study how these properties vary in their blends, which will serve to predict their subsequent performance and



their technical standardization, facilitating the recycling process. Thus, the objective of this work is to study the properties of binary blends of recycled polypropylene with recycled mixed polyolefins, specifically high density polyethylene and low density polyethylene recycled in different proportions, without using compatibilising agents. In addition, blends of recycled polypropylene with recycled polylactic acid are studied as an alternative for 3D printing waste, a prevalent processing method for this polymer. Binary blends were made at 20, 40, 60 and 80 % by weight using a twin-screw extruder and the properties of each blend were determined by infrared spectroscopy, differential scanning calorimetry, melt flow index measurements and tensile tests. The results revealed that although there was no miscibility, the polyethylene blends gradually increased tensile strength with the addition of recycled polypropylene.

1. INTRODUCCIÓN

Desde mediados del siglo XIX, la industria del plástico ha desempeñado un papel fundamental en el avance tecnológico debido a las características únicas de los materiales poliméricos que los hace idóneos para múltiples aplicaciones. Sin embargo, la producción y el uso indiscriminado de estos materiales, sumado a su durabilidad, han ocasionado una grave problemática ambiental causada por la generación de residuos altamente persistentes y esparcidos en todos los ecosistemas [1]. Las poliolefinas (PO), por ejemplo, se destacan por su alta inercia química y biológica, lo que las hace ideales en numerosas aplicaciones, como por ejemplo los empaques. Sin embargo, su notable resistencia a la degradación y su uso generalizado combinado con una disposición inapropiada de estos materiales los ha convertido en un serio problema ambiental. Abordar esta situación se ha convertido en uno de los principales desafíos globales del siglo XXI [1].

Uno de los principales factores que agrava esta problemática de los residuos poliméricos es su creciente producción. Según algunas estimaciones, la producción mundial de plástico alcanzó los 390,7 millones de toneladas (Mt) en el año 2021 y se espera que

esta cifra se duplique en los próximos 20 años [2]. Las PO, polietileno (PE) y polipropileno (PP), representan alrededor del 47 % del consumo mundial de plásticos, mientras que en Colombia esta cifra aumenta al 56 % [3]. Dado que sus aplicaciones suelen ser de corta duración, son los plásticos que más residuos generan [2].

De otro lado, las técnicas de fabricación aditiva (FA), como la impresión 3D, están emergiendo rápidamente como una tecnología para la creación rápida de prototipos. Sin embargo, entre el 5 y el 10 % de todos los productos de impresión 3D son desechados y terminan en vertederos [4]. Uno de los polímeros más utilizados en la impresión 3D es el ácido poli láctico (PLA), un poliéster alifático proveniente de recursos agrícolas, el cual es biodegradable pero sólo bajo ciertas condiciones, por lo cual su uso masivo genera una gran acumulación de residuos a nivel mundial [5].

Para abordar esta problemática, existe un creciente interés en la gestión de residuos plásticos, así como un mayor avance en el reciclaje mecánico y químico. Además, se están introduciendo nuevas tecnologías basadas en plásticos biodegradables [6]. De esta manera se pretende reducir la cantidad de residuos plásticos generados cada año y



disminuir la acumulación en vertederos. El reciclaje mecánico sigue siendo uno de los métodos más utilizados para el reciclaje de plásticos, que posibilita la implementación de una economía circular [2]. Sin embargo, este proceso presenta algunos desafíos, como la heterogeneidad de los polímeros y su degradación a causa del reprocesado que afectan significativamente las propiedades de los polímeros [7]. Además, la clasificación y recolección de los materiales plásticos puede resultar difícil, y la presencia de contaminantes en los materiales posconsumo disminuye la eficiencia de este proceso [6].

En relación con las PO, se suelen encontrar comúnmente en los residuos sólidos municipales (RSM), especialmente el PP (polipropileno) y los polietilenos de diferentes densidades: HDPE (high density polyethylene), LDPE (low density polyethylene) y LLDPE (linear low density polyethylene), formando parte de la fracción ligera del flujo de residuos sólidos plásticos. Estos polímeros poseen una densidad similar, lo que da como resultado una separación imprecisa, que conlleva a una contaminación cruzada entre las poliolefinas recicladas (PPr). Por ejemplo, en el PP reciclado se encuentra alrededor de un 4 % en peso de PE y en el PE reciclado aparece entre 8 a 10 % en peso de PP. Dado que ambos polímeros son inmiscibles entre sí, las mezclas resultantes tienen un rendimiento mecánico deficiente, incluso cuando están presentes en cantidades bajas, lo que limita su aplicabilidad en la industria [7]. Sin embargo, estas mezclas conocidas como poliolefinas mixtas recicladas (MPOr) están ampliamente disponibles como recursos de materiales secundarios, porque suelen ser más económicas que las poliolefinas vírgenes. A pesar de que pueden presentar propiedades inferiores, 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, como un monómero de etileno-propileno-dieno (EPDM) o copolímeros de bloque [8, 9]. No obstante, el uso de compatibilizantes incrementa el costo de producción del polímero reciclado.

Con el objetivo de aprovechar de manera eficiente las poliolefinas obtenidas a partir del reciclaje mecánico, es necesario desarrollar un estudio sistemático que contribuya al entendimiento de las propiedades de estos polímeros para su reutilización. Por lo tanto, este trabajo se enfoca en analizar la propiedades de las mezclas de PPr con otras poliolefinas y PLA provenientes de la corriente de residuos sólidos, sin necesidad de agentes compatibilizantes, con el fin de proporcionar información útil para sectores industriales específicos.

2. MATERIALES Y METODOS

2.1. Materiales utilizados

Para la elaboración de las mezclas binarias de materiales reciclados se utilizaron poliolefinas recicladas (MPOr) y residuos de impresión 3D de ácido poliláctico reciclado (PLAr). Las MPOr, específicamente polipropileno reciclado (PPr) y polietileno de alta densidad y baja densidad reciclados (HDPEr y LDPEr respectivamente), fueron suministradas por la empresa PLASTICOS AMBIENTALES S.A.S., ubicada en el municipio de Sabaneta. El PLAr fue proporcionado por 3D Diseños, Ideas 3D y Universo 3D, empresas ubicadas en Medellín.

2.2. Elaboración de las mezclas

2.2.1 Formulación de mezclas

Se llevaron a cabo mezclas de PPr con LDPEr, PPr con HDPEr y PPr con PLAr en



proporciones de 20, 40, 60 y 80 % en peso. Estas proporciones se eligieron debido a que cubren un amplio rango de composiciones. Se usó el PPr como el segundo componente de cada mezcla binaria por ser un material económico y ampliamente disponible.

2.2.2 *Procesamiento de las mezclas*

La elaboración de las mezclas se llevó a cabo utilizando una extrusora de doble husillo de la marca EVERPLAST modelo TE 35 de doble estación, tipo corte cadena con línea para peletizado, ubicada en las instalaciones del laboratorio de pruebas de calzado y polímeros avanzado (LACPA) del Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). Las condiciones óptimas para la extrusión fueron seleccionadas teniendo en cuenta el índice de fluidez (MFI) de cada una de las materias primas. Estos valores proporcionan un punto de partida para ajustar el perfil de temperatura de la extrusora, así como la velocidad de extrusión (tasa de salida), para lograr una fluidez adecuada, garantizar la homogeneización de las mezclas y evitar la degradación térmica del material durante el proceso [10]. Es de anotar que fue posible la elaboración de todas las mezclas excepto la mezcla de PPr y PLAr en proporción 20/80 (P/P). Al extruir esta mezcla, fluyó primero el PLAr que tenía una menor viscosidad de fundido y no se incorporó con el PPr.

2.2.3 *Caracterización de las materias primas y de las mezclas*

Las materias primas, así como las mezclas fueron caracterizadas mediante las siguientes técnicas.

Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), con el propósito de identificar los materiales de partida para la elaboración de las mezclas y estudiar sus posibles cambios químicos después de realizarlas. Se usó un espectrofotómetro Perkin-Elmer Spectrum Two con accesorio de reflectancia total atenuada (ATR) Smart Orbit. Los espectros fueron registrados en el rango de 4000 a 500 cm^{-1} con una resolución de 4 cm^{-1} .

Ensayos de calorimetría diferencial de barrido (DSC), usados para analizar el comportamiento térmico. Se usó un equipo de la marca TA Instruments, modelo Q100. Los datos se registraron en un intervalo de temperatura entre 25 a 200 °C, en atmósfera de nitrógeno. Se hizo un barrido térmico hasta 200 °C, seguido de enfriamiento y calentamiento a 10 °C min^{-1} para obtener las curvas de cristalización y fusión respectivamente.

Medida del índice de fluidez (MFI). La comparación de esta medida antes y después de ser transformado el material, proporciona información valiosa sobre su procesabilidad y posible degradación. El valor del MFI para todos los materiales se determinó por triplicado, bajo los parámetros especificados por la norma ASTM D1238 para el PP, a temperatura de 230 °C y una carga de 2,16 kg, utilizando un equipo Atlas Electric Devices. El PLAr se secó a 45 °C durante 4 horas en una estufa de laboratorio marca Binder antes de la medida del MFI.



Análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM). Esta técnica permitió la evaluación de cambios en la morfología después del proceso de mezclado. Las micrografías se obtuvieron en un equipo de la marca JEOL-JSM 6490LV. Para mejorar la conductividad superficial de las muestras se recubrieron por pulverización catódica (sputtering) con oro.

Ensayos de propiedades mecánicas bajo tensión. Estos ensayos se realizaron para determinar la influencia del mezclado en las propiedades mecánicas. Para la medición, se inyectaron probetas tipo I según la norma ASTM-D 638-14, en una inyectora marca WELLTEC, Modelo TTI-90SEII serie DH-20101833/35 del laboratorio LACPA del SENA. El ensayo de tensión fue realizado bajo la norma ASTM D638-14, usando una máquina universal de ensayos Shimadzu AGS-X 50 KN de doble columna, a una velocidad constante de 10 mm/minuto para cinco probetas de cada material.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1. Resultados de la caracterización química y térmica

3.1.1. Resultados de la caracterización por FTIR.

En la Figura 1 se muestra la comparación de los espectros de las materias primas y las mezclas estudiadas. Los materiales de partida, PPr, HDPEr, LDPEr y PLAr, mostraron las bandas características de estos materiales. Sin embargo, la presencia de algunas bandas atípicas, pueden ser atribuidas a algunas impurezas, lo cual es de esperarse debido a que se trata de materiales obtenidos de reciclaje posconsumo

Para el caso del PPr, además, se observó una banda de absorción característica del PE en

720 cm^{-1} debido al movimiento de tijero (ν) de varios grupos CH_2 consecutivos [11]. Este hallazgo sugiere que este material es una mezcla del PP con una pequeña proporción de PE.

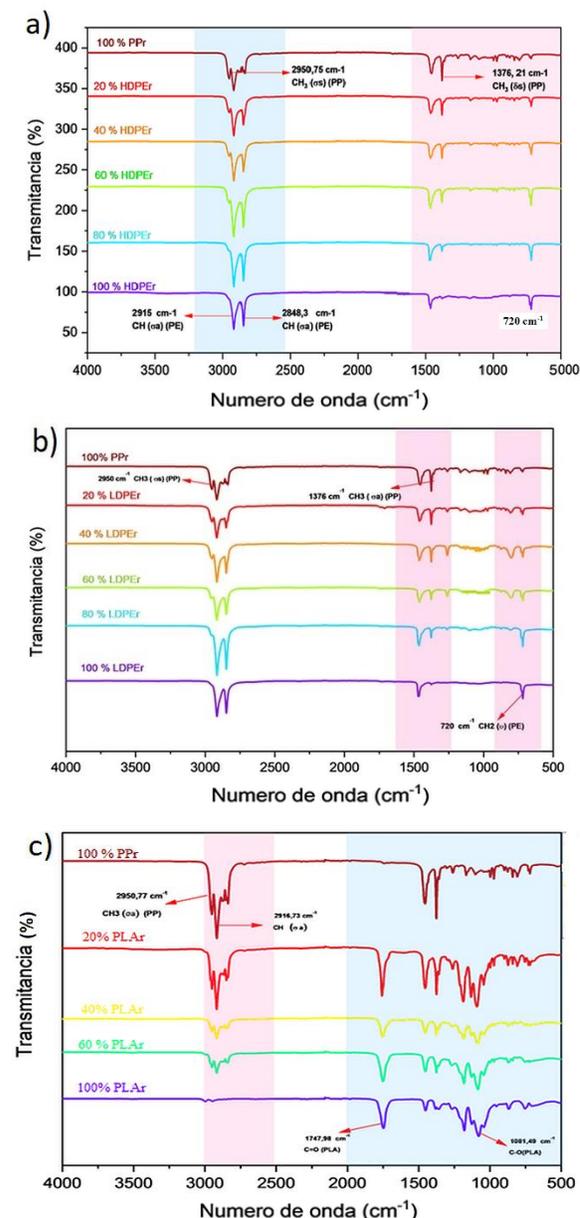


Figura 1. Espectros FTIR de las mezclas con PPr a) HDPEr b) LDPEr c) PLAr

Con respecto a los dos tipos de PE, denominados HDPEr y LDPEr, aunque presentan espectros muy similares entre sí, se observan diferencias en la intensidad de la

banda de absorción alrededor de 1378 cm^{-1} asociada con el estiramiento de enlaces CH de grupos CH_3 . Esta es más intensa para el LDPEr, lo que indica la presencia de un mayor número de ramificaciones [11].

En general, los espectros no mostraron cambios químicos con respecto a los materiales de partida después de la mezcla con PPr. Se evidenciaron variaciones de intensidad de los diferentes picos de absorción, lo cual es consecuencia de la mayor proporción de uno de los polímeros.

3.1.2 Resultados de la caracterización por DSC

Los resultados de los ensayos de DSC se resumen en la Tabla 1 y en las figuras 2a-c que presentan las curvas de fusión de las mezclas de PPr con HDPEr, LDPEr y PLAr respectivamente.

El análisis de la curva de fusión del PPr, a partir del cual se realizaron todas las mezclas, permite concluir que es un homopolímero, mostrando una endoterma con temperatura de fusión a $164,42\text{ }^\circ\text{C}$. Se observa además una segunda endoterma de menor intensidad con un mínimo en $126,10\text{ }^\circ\text{C}$, característica de un HDPE [12]. 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.

Se puede concluir que estos materiales son inmiscibles ya que presentan dos fases cristalinas bien diferenciadas. La proporción de HDPE se puede estimar en 10 % en peso, al hacer una relación de las entalpías de fusión de ambos picos, como puede observarse de la Tabla 1.

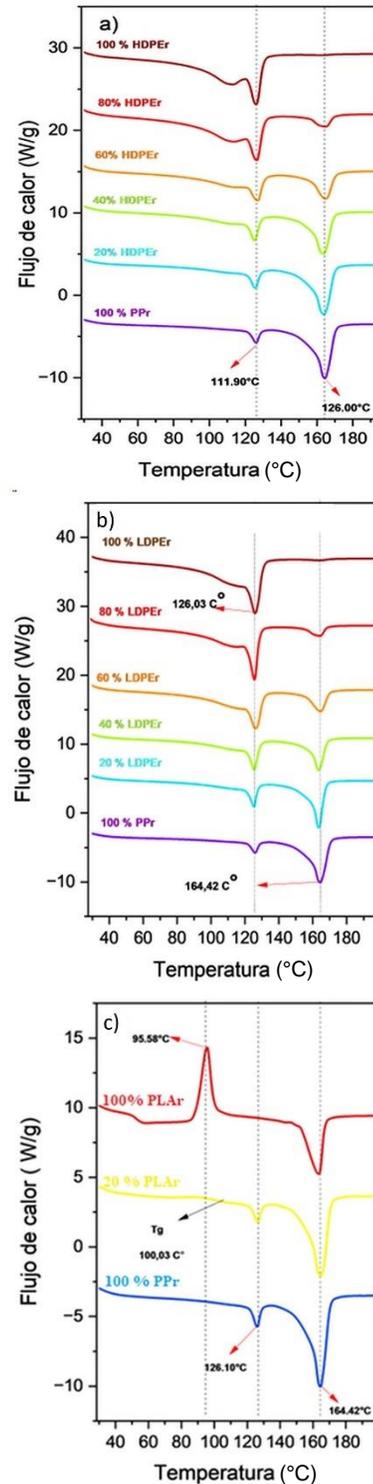


Figura 2. Curvas de fusión de las mezclas con PPr a) HDPEr b) LDPEr c) PLAr



Tabla 1. Resultados de los ensayos de DSC para PP reciclado y las mezclas con HDPE reciclado, LDPE reciclado y PLA reciclado. Se listan las temperaturas de fusión y cristalización para cada transición y su correspondiente entalpía

Muestra	Fusión					Cristalización			
	Transición (°C)			ΔH (J/g)		Transición (°C)			ΔH (J/g)
	1	2	3	1 - 2	3	1	2	3	
PP		126,10	164,42	6,95	56,45		113,18	123,25	94,49
HDPE 20%	112,33	125,55	164,04	14,97	52,94		112,33	121,92	107,70
HDPE40%	110,15	125,10	163,81	27,12	42,88	94,2	112,12	121,35	111,10
HDPE60%	112,12	127,16	165,22	44,93	26,14	93,77	109,77	118,02	105,10
HDPE 80%	111,90	126,45	164,93	90,03	10,49	57,73	94,63	110,67	112,90
HDPE	111,90	126,00		121,7		94,63	111,54		114,40
LDPE 20%	110,20	125,32	163,45	24,52	47,63		113,82	123,29	102,60
LDPE40%	112,76	125,56	163,54	42,65	32,58	96,33	113,4	121,89	95,57
LDPE60%	112,97	126,38	164,94	60,76	19,89		112,58	119,37	98,94
LDPE 80%	111,90	125,61	164,41	90,11	10,40	98,25	113,63		90,45
LDPE	110,20	126,03	164,38	116,00	1,31	95,48	113,04		114,50
PLA 20%	100,03*	126,49	164,97	4,93**	48,97		112,97	121,36	80,48
PLA	52,11*	95,61	163,66	-38,33**	25,19				

*Transición vítrea

**Sólo se integra la transición 2

El HDPEr muestra el comportamiento de fusión típico de este polímero, con una temperatura cercana a 126 °C. Del calor asociado a la endoterma se deduce su alta cristalinidad. Se observa también la presencia de una transición a menor temperatura, separada de la principal, indicando que está mezclado con LDPE. De otro lado, el material denominado LDPE reciclado presenta una alta temperatura de fusión que se asocia con la transición típica del HDPE y no con la de un polietileno de baja densidad. También se deduce que es un material altamente cristalino por su alto calor de fusión. Es posible que este material corresponda a un polietileno lineal de baja densidad (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 el que se presenta para el HDPE reciclado. Este comportamiento se asocia al LLDPE debido a que este es un copolímero de bloque con una 1-olefina, la que co-cristaliza con el comonomero lineal [12]. También se observa una pequeña transición correspondiente al PP

a 164 °C, en una proporción estimada a partir de los calores de fusión, no mayor al 2 % en peso.

Las mezclas obtenidas del PPr con los dos tipos de PE reciclados 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, más cristalino que el PP como se explicó anteriormente. Las temperaturas de fusión y cristalización de los componentes permanecen invariables para todas las mezclas, lo que indica inmiscibilidad.

Estos resultados confirman que la morfología cristalina del PP reciclado no se ve alterada por la presencia del PE. Dado que el PP tiene una viscosidad mucho menor que los dos tipos de PE usados (como se deduce de los valores de MFI), es factible que los cristales de PE estén rodeados de cristales de PP, pero sin que haya una interface cristalina común. De lo anterior se concluye que los sistemas de PP/PE son incompatibles.



El PLAr es un material semicristalino, en el que pudo verse una transición vítrea, una cristalización fría o cristalización exotérmica en el fundido, seguido de la endoterma de fusión de estos cristales metaestables. La cristalización fría de los poliésteres se ha atribuido a una autonucleación exotérmica por encima de la T_g que se favorece en el ciclo de calentamiento [13].

La mezcla de PLA con 20 % PP no mostró el comportamiento observado para el PLA sin mezclar. Se observó una T_g a 100,03 °C, mucho mayor que la del PLA puro (alrededor de 53 °C), pero no se observó la cristalización fría del PLA 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 PP reciclado de partida. El calor de fusión de estas dos endotermas es debido únicamente a los cristales de PPr. Al parecer el PP impide la cristalización del PLA e inmoviliza sus cadenas aumentando su transición vítrea a la temperatura de su autonucleación e impidiendo la cristalización en frío. Se sabe que el PLA y el PP son intrínsecamente incompatibles 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 PLA, la dispersión de los cristales estables de PP en el dominio de PLA, impide su nucleación y lo rigidiza, fragilizando el material resultante [13].

3.1.3 Resultados de las medidas de MFI.

Los resultados de las medidas de MFI se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores obtenidos de MFI para los materiales de partida y sus mezclas.

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

Todos los ensayos de MFI se realizaron bajo las condiciones para el PP: 230 °C y 2,16 Kg, excepto por el PLAr que no mostró flujo continuo a esta temperatura y se midió a 190 °C. Se observa que el PPr presenta un mayor MFI que los demás materiales y al realizar las mezclas se observó la disminución o aumento proporcional del MFI con la variación del contenido de PPr, debido a su mayor fluidez. Se podría decir que estas mezclas son inmiscibles en el fundido y que, posiblemente exista cierta miscibilidad parcial en la fase amorfa. Esta compatibilidad parcial podría caracterizarse con las transiciones vítreas de las mezclas, las cuales no pudieron ser determinadas en el presente trabajo. Las mezclas con PLAr, por el contrario, no mostraron esta tendencia y se concluye que son totalmente incompatibles.

3.1.4 Resultados de las medidas por SEM

La Figura 3 muestra las micrografías SEM de los materiales de partida y de algunas de las mezclas. En las imágenes se observa una fase continua de todos los materiales evaluados, excepto para las mezclas con PLAr. Se esperaban dos fases debido a la



incompatibilidad de las mezclas obtenidas, pero la diferenciación de estas fases dentro de la mezcla no pudo visualizarse debido a la dificultad de conseguir un contraste entre las poliolefinas por su gran similitud química, lo que constituye una limitación de la técnica de SEM.

Las dos fases si fueron visibles en las micrografías obtenidas para las mezclas con PLAr (Figura 3), explicada como una morfología matriz – gota (micrografía del 20 % en peso PLAr), la que cambia a matriz-fibra a medida que aumenta el contenido de PLAr (micrografía del 40 % en peso PLAr). Este cambio es generado por la deformación de la fase dispersa, cuando las gotas empiezan a coalescer. Se puede apreciar que no existe buena adherencia entre la matriz y la fase dispersa, por los espacios vacíos que se encuentran entre ellas. Estas imágenes corroboran la incompatibilidad entre el PPr y el PLAr [14].

Con respecto a las micrografías de las mezclas de PO, se observaron superficies rugosas, deformaciones y defectos (rayones, micro fisuras, poros) asociados al proceso de extrusión y pelletizado inherentes al proceso de reciclaje. Micrografías de PO vírgenes muestran superficies lisas que se vuelven irregulares por contaminación, aditivos o degradación. Estas irregularidades también son signo de la inmiscibilidad de los distintos componentes en el material [15].

La fluidez también tiene un efecto en la superficie del extruido. A menor fluidez es más factible que se generen anomalías de flujo y el extruido sea menos uniforme. Este efecto se puede observar claramente en las mezclas con 20 % en peso de HDPEr o LDPEr, las cuales presentan una superficie más lisa en comparación con las que tienen 60 % en peso de PEr. El PPr, que tiene un mayor MFI exhibe un efecto plastificante y posibilita un fluido más homogéneo. Al

disminuir el MFI (o sea al aumentar la viscosidad) la rugosidad superficial es mayor.

3.1.5 Resultados de las pruebas mecánicas bajo tensión

En la Tabla 3, se resumen los resultados obtenidos de las pruebas de tensión y en la Figura 4 se adicionan gráficos de tendencias. Se observa que el PPr presenta propiedades mecánicas más elevadas en comparación con el HDPEr, LDPEr y el ácido poliláctico (PLAr). Esto se puede relacionar con la estructura química más rígida del PP debido a la presencia del sustituyente metilo que restringe la rotación de la cadena polimérica. En contraste, el HDPEr y LDPEr, exhiben una mayor capacidad de alargamiento debido a la mayor flexibilidad de los grupos metileno, y a su vez, una menor resistencia a la tracción en comparación con el PP.

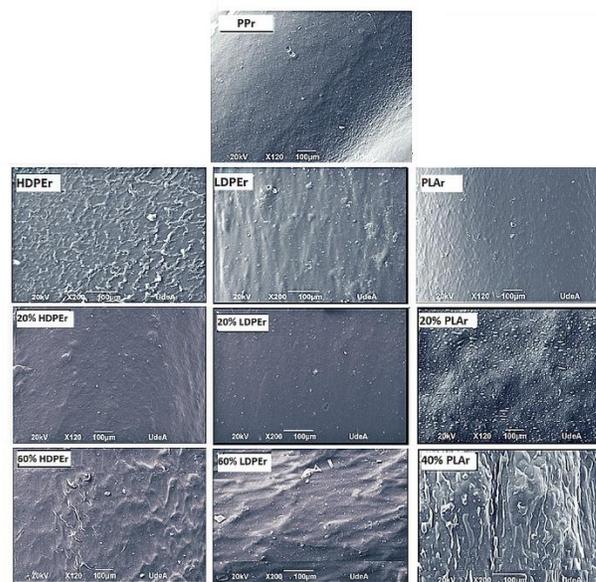


Figura 3. Micrografías SEM de los materiales iniciales y de algunas de las mezclas con PPr: 20 y 60 % HDPEr; 20 y 60 % LDPEr y 20 y 40 % PLAr

Aunque el HDPEr y el LDPEr presentan un comportamiento mecánico similar, las propiedades mecánicas analizadas son un poco más altas en el HDPEr, debido a que es

un polímero lineal con pocas ramificaciones en comparación al LLDPE más ramificado, lo que le posibilita una mayor densidad, que a su vez confiere mayor rigidez al material [16]. Esto se asocia con la mayor entalpía de fusión del HDPEr con relación al LDPEr lo que indica una mayor cristalinidad. Además el HDPEr tiene menor MFI, que podría relacionarse con un mayor peso molecular. Por otro lado, la presencia de puentes de hidrógeno en el PLAr, le otorgan una elevada rigidez [5].

Se esperaba que la adición de PPr, aumentaría la resistencia a la tensión en las

mezclas, lo cual se evidenció en las mezclas con contenidos menores de 80 % en peso de PP. Por encima de esta proporción se disminuye la resistencia a la tensión, lo que sugiere una mala compatibilidad y una adhesión más débil entre las fases [5].

Para las mezclas de PLAr, se observa que con el aumento de PPr aumenta el módulo de elasticidad y resistencia a la tensión. Sin embargo, la mezcla con 60 % en peso de PLAr presentó una disminución de estas propiedades, debido a la mala adherencia entre PLAr y PPr, como se observó por SEM.

Tabla 3. Resultados de los ensayos 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



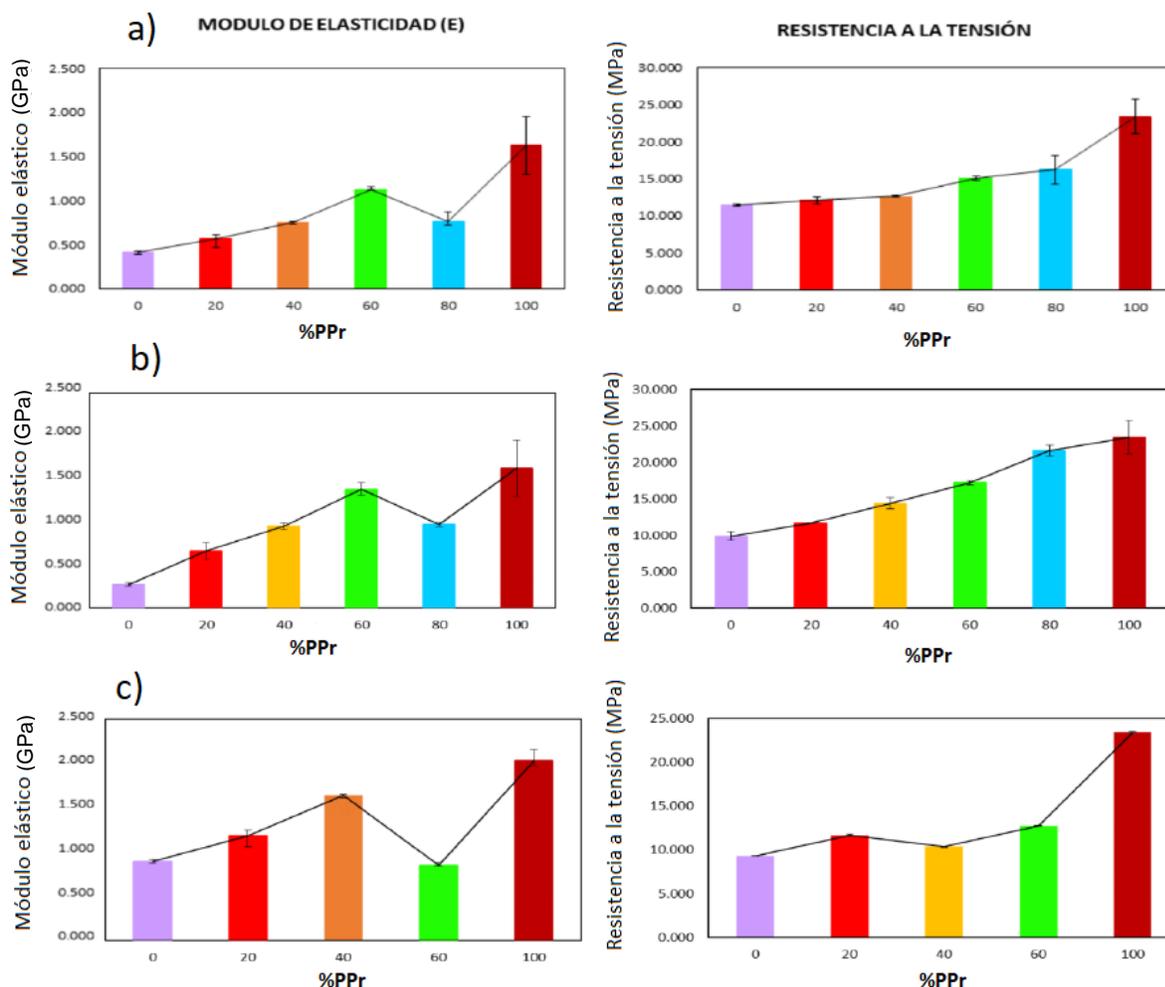


Figura 4. Relación entre la composición PPr, la resistencia a la tensión y el módulo de elasticidad para mezclas: a) PPr-HDPEr, b) PPr-LDPEr y c) PPr-PLAr

4. CONCLUSIONES

Se realizaron mezclas binarias de PPr con HDPEr, LDPEr y PLAr, en un amplio rango de proporciones. Dado que el PPr utilizado tiene mayor MFI que los PEr, su incorporación en las mezclas mejoró su procesabilidad, lo cual impacta positivamente el procesamiento. Aún sin hacer uso de agentes compatibilizantes es posible mejorar ciertas propiedades a través del mezclado, como es el caso del aumento de la resistencia a la tensión y la fluidez de los polietilenos reciclados con la incorporación de pequeñas

cantidades de PPr. No se obtuvieron buenos resultados con las mezclas obtenidas a partir del PLAr.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al “Fondo para Apoyar los Trabajos de Grado en los Programas de Pregrado de la Facultad de Ingeniería”, a través del proyecto PR23-1-02 por la financiación de este trabajo.



6. REFERENCIAS

- [1] OECD, “Projections of the environmental impacts of the plastics lifecycle to 2060,” In: *Global Plastics Outlook: Policy Scenarios To 2060*, OECD Publishing, 1st ed, ch. 6, Francia, 2022.
- [2] PLASTICS EUROPE, [Online], Available: <https://plasticseurope.org/es/wpcontent/uploads/sites/4/2023/02/PLASTICOSSITUACION-2022-esp.pdf>, [Accessed: 23-Nov-2023].
- [3] ACOPLASTICOS, [Online], Available: <https://acoplasticos.org/2024/09/12/plasticos-en-colombia-2024/>, [Accessed: 25-Nov-2023].
- [4] Posch, D. W., “Polyolefins”, In: *Applied Plastics Engineering Handbook*, M. Kutz, 2nd ed, ch. 2, Elsevier, USA, 2017.
- [5] Nagarajan, V., Mohanty, A. K., Misra, M., “Perspective on Poly(lactic Acid (PLA) based Sustainable Materials for Durable Applications: Focus on Toughness and Heat Resistance”, *American Chemical Society Sustainable Chemistry and Engineering*, vol. 4, núm. 6, pp. 2899–2916, jun. 2016.
- [6] Vollmer, I., Jenks, M.J.F., Roelands, M.C.P., et al., “Beyond mechanical recycling: giving new life to plastic waste”, *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 59, núm. 36, pp. 15402–15423, sep. 2020.
- [7] Kukaleva, N., Simon, G. P., Kosior, E., “Binary and ternary blends of recycled high-density polyethylene containing polypropylenes”, *Polymer Engineering & Science*, vol. 43, núm. 2, pp. 431–443, feb. 2003.
- [8] Al-Juhani, A. A., Suleiman, M. A., “Study of the Effect of EPDM Structure on the Compatibility of PP/LDPE Blends”, *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 37, núm. 4, pp. 863–875, jun. 2012.
- [9] Vervoort, S., Doelder, J., “Compatibilization of polypropylene–polyethylene blends”, *Polymer Engineering and Science*, vol. 58, núm. 4, pp. 460–465, abr. 2018.
- [10] Jones, H., McClements, J., Ray, D., Hindle, C. S., Kalloudis, M., Koutsos, V., “Thermomechanical properties of virgin and recycled polypropylene—high-density polyethylene blends”, *Polymers (Basel)*, vol. 15, núm. 21, p. 4200, oct. 2023.
- [11] Stuart, B., *Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications*, John Wiley & Sons, New Jersey, 2004.
- [12] Sutar, H., Sahoo, P.C., Sahu, P.S., et al., “Mechanical, thermal and crystallization properties of polypropylene (PP) reinforced composites with high density polyethylene (HDPE) as matrix”, *Materials Sciences and Applications*, vol. 09, núm. 05, pp. 502–515, 2018.
- [13] Cuiffo, M. A., Snyder, J., Elliott, A. M., Romero, N., Kannan, S., Halada, G.P., “Impact of the fused deposition (FDM) printing process on poly(lactic acid (PLA) chemistry and structure”, *Applied Sciences*, vol. 7, núm. 6, p. 579, jun. 2017.
- [14] Karaagac, E., Jones, M.P., Koch, T., Archodoulaki, V.-M., “Polypropylene contamination in post-consumer polyolefin waste: characterisation, consequences and compatibilisation”, *Polymers (Basel)*, vol. 13, núm. 16, p. 2618, ago. 2021.
- [15] Al-Salem, S.M., Behbehani M.H., Al-Hazza’a, A., et al., “Study of the degradation profile for virgin linear low-density polyethylene (LLDPE) and polyolefin (PO) plastic waste blends”, *Journal of Material*



Cycles and Waste Management, vol. 21, núm. 5, pp. 1106–1122, sep. 2019.

[16] Aumnate, C., Rudolph, N., Sarmadi, M., “Recycling of polypropylene/polyethylene blends: Effect of chain structure on the crystallization behavior”, *Polymers (Basel)*, vol. 11, núm. 9, p. 1456, sep. 2019.

