

Mechanical behavior of mixtures of polylactic acid (PLA) with polystyrene (PS)

Jhonny Medina^{*,a}, Patricia Cedeño^a, Ricardo Heras^a, Juan Carlos Hernández^a y Carlos Zapata^b

^aLaboratorio de Polímeros, Centro de Investigaciones Químicas, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

^bLaboratorio de Polímeros, Departamento de Polímeros, Instituto Universitario de Tecnología de Valencia, Valencia, Venezuela.

Abstract.- The main objective of this research was to evaluate the mechanical behavior of mixtures of polylactic acid (PLA) with polystyrene (PS). For this, mixtures were prepared using the direct mixing technique, and different mechanical tests were carried out, such as: the flow index, hardness test, stress and impact tests. In addition, infrared spectroscopy, with the purpose of obtaining a mixture of PLA with PS, with suitable characteristics for the development of new products that are friendly to the environment. The method of direct mixing was adequate, because the values of the mechanical properties analyzed are in the intermediate range of the values of the pure polymers. The mixture 50 % PLA / 50 % PS was the one that had the lowest flow index, so it was considered as the mixture with the best mechanical behavior. The displacements of the bands in the infrared spectra indicate that there are certain interactions between the constituents of the mixtures, associated with their miscibility. The incorporation of 2,5 % of DOP to the mixture causes an antiplastification effect, which produces a material with a fluidity index of 3,24 g / 10min, a hardness (Shore A) of 93,3 adm, an impact resistance of 43,19 J / m² and a tensile strength of 2,90 MPa.

Keywords: mechanical behavior; polystyrene; polylactic acid; polymer mixtures.

Comportamiento mecánico de mezclas de ácido poliláctico (PLA) con poliestireno (PS)

Resumen.- El objetivo fundamental de esta investigación fue evaluar el comportamiento mecánico de mezclas de ácido poliláctico (PLA) con poliestireno (PS). Para esto, se prepararon mezclas mediante la técnica de mezclado directo, y se realizaron diferentes pruebas mecánicas, tales como: el índice de fluidez, ensayo de dureza, pruebas de tensión e impacto. Además, de espectroscopia infrarroja, con el propósito de obtener una mezcla de PLA con PS, con características adecuadas para el desarrollo de nuevos productos que sean amigables con el ambiente. El método de mezclado directo resultó adecuado, debido a que los valores de las propiedades mecánicas analizadas se encuentran en el rango intermedio de los valores de los polímeros puros. La mezcla 50 %PLA / 50 %PS fue la que tuvo el menor índice de fluidez, por lo que se consideró como la mezcla con mejor comportamiento mecánico. Los desplazamientos de las bandas en los espectros infrarrojos indican que existen ciertas interacciones entre los constituyentes de las mezclas, asociados a la miscibilidad de los mismos. La incorporación de 2,5 % de DOP (estabilizante térmico) a la mezcla ocasiona un efecto anti plastificación, lo que produce un material con un índice fluidez de 3,24 g/(10 min), una dureza (Shore A) de 93,3 adm, una resistencia al impacto de 43,19 J/m² y una resistencia a la tensión de 2,90M Pa.

Palabras claves: comportamiento mecánico; poliestireno; ácido poliláctico; mezclas de polímeros.

Recibido: enero 2018

Aceptado: mayo 2018

1. Introducción

En la actualidad la industria del plástico depende en gran medida de los polímeros derivados del petróleo. La baja degradabilidad de estos materiales representa un problema ambiental. Por lo que, existe la necesidad de sustituirlos por materiales biodegradables cuyo comportamiento

*Autor para correspondencia:

Correo-e: jhonnymedina@yahoo.com (Jhonny Medina)

mecánico y costos de producción sean atractivos para su procesamiento a nivel industrial. En este sentido, El ácido Poliláctico (PLA) es una alternativa para enfrentar dicha problemática, debido a que es un polímero biodegradable derivado del ácido láctico que se obtiene a partir de recursos renovables tales como el maíz, la remolacha, el trigo, entre otros. Este polímero tiene propiedades mecánicas en el mismo rango de polímeros petroquímicos a excepción de una baja elongación. Por ser biodegradable y reabsorbible el PLA tiene múltiples aplicaciones en la medicina, en la industria textil, cosméticos, en el sector de los alimentos, bebidas, entre otras [1, 2, 3].

A pesar de la biodegradabilidad del PLA, sus características mecánicas hacen de éste un polímero con ciertos inconvenientes para su procesamiento a nivel industrial. Es por eso, que debe combinarse con otros polímeros biocompatibles, con rellenos, reforzantes, plastificantes u otros aditivos para así mejorar sus propiedades mecánicas. En este sentido, se ha incrementado el interés en el estudio de mezclas de PLA con diversos polímeros. Ponce, en el año 2014, analizó la mezcla de ácido poliláctico con polipropileno (PP) [4], en tanto, que Biresaw y Carrier, en el año 2003, estudiaron las propiedades del PLA con poliestireno (PS) [5]. Los resultados obtenidos en las investigaciones señaladas sugieren que se debe profundizar en el estudio del comportamiento de mezclas poliméricas con PLA, ya que se obtuvieron mejoras favorables en las propiedades de dicho polímero. Es por ello, que en esta investigación se busca profundizar en el estudio de la mezcla polimérica de PLA con PS como alternativa para su aprovechamiento y para contribuir con el saneamiento ambiental, promoviendo un mayor consumo de polímeros biodegradables, y de esta manera, disminuir la dependencia de polímeros derivados del petróleo; ya que, estos son contaminantes y la mayoría no son reciclables, ni biodegradables [1].

Es de resaltar, que el poliestireno (PS), es un polímero termoplástico que se caracteriza por ser liviano, resistente al agua, resistente mecánicamente, y ofrece una gran dureza y rigidez. El PS es un material que no tiene peligro en su

uso cotidiano. Lo cual ha sido demostrado por su amplio uso en el mundo como material de envases y embalajes en el sector agro-alimentario. El cual, implica un contacto directo con los alimentos. Este polímero ocupa el cuarto lugar en el mundo, en cuanto a consumo se refiere.

Ahora bien, la preparación de mezclas poliméricas se orientan a la creación de nuevos productos amigable con el ambiente, como estrategia para la diversificación de la producción nacional e incidencia en la economía del país, ya que se promueve el uso de productos elaborados a partir de fuentes naturales, tal como el ácido poliláctico y no los comúnmente usados que provienen de los derivados del petróleo [6]. Entre los métodos que se emplean en la actualidad para la preparación de mezclas poliméricas, se encuentra el método de mezclado en físico debido a que los productores de la industria del plástico buscan desarrollar nuevos materiales a partir de este proceso, dado que se requiere de una menor inversión de capital [7]. Esta afirmación, se corrobora con lo señalado por otros autores, quienes señalan que el mezclado de dos o más polímeros para formar un nuevo material se establece ampliamente como un medio para obtener nuevos productos con propiedades a la medida de las necesidades del ser humano, presentándose como una forma alterna a la síntesis de copolímeros que generalmente envuelven costos elevados [8].

En este sentido, diferentes autores realizaron una investigación exploratoria para conocer las últimas tendencias y logros en el campo de la compatibilización de mezclas de polímeros de base biológicas y biodegradables. Los autores concluyeron que la modificación de estos polímeros es una manera de mejorar sus propiedades y lograr combinaciones con características adecuadas para aplicaciones específicas. Además, establecieron que la técnica de mezclado directo es un método relativamente barato y rápido para mejorar las propiedades de los plásticos. Pero, que era necesario realizar estudios para profundizar en las relaciones entre la miscibilidad, estructura y propiedades de estos materiales para poder utilizar todas las potencialidades de la mezcla preparada [6].

En virtud de lo anterior, se planteó en esta investigación la preparación de mezclas de ácido Poliláctico (PLA) con Poliestireno (PS) mediante la técnica de mezclado directo, para analizar el comportamiento mecánico de las mismas. Para esto, se realizaron diferentes pruebas mecánicas, tales como: el índice de fluidez, ensayo de dureza, pruebas de tensión e impacto. Además, de espectroscopia infrarroja, con el propósito de obtener una mezcla de PLA con PS, con características adecuadas para el desarrollo de nuevos productos que sean amigables con el ambiente.

2. Metodología

El ácido poliláctico, marca NatureWords, utilizado en esta investigación fue adquirido de un proveedor en Louisiana en los Estados Unidos de Norteamérica. En tanto que el poliestireno tipo expandido fue obtenido de las bandejas B-4 de Industrias Gran Parada, C.A. ubicada en Valencia, Venezuela. Los materiales fueron trasladados al Laboratorio de Polímeros del Centro de Investigaciones Químicas (CIQ) para su tratamiento. En este sentido, las bandejas de Poliestireno fueron cortadas en trozos de aproximadamente 4x4 cm con la ayuda de una tijera, luego se colocaron en un vaso de precipitados para disolverlas en cloroformo. El polímero disuelto se colocó en una estufa modelo Precisión Scientific a 100 °C durante 4 horas para evaporar el solvente y obtener el Poliestireno de manera compacta. Luego, se procedió a moler el Poliestireno obtenido y el ácido poliláctico, por separado, en un molino marca Condux-Werk modelo LV 15/M. Posteriormente, se tamizó cada material en un tamiz ASTM-N° 10 con una abertura de 0,0787 pulgadas, y se almacenaron en frasco de vidrio.

Se prepararon mezclas de PLA con PS mediante mezclado directo de los materiales, en las siguientes proporciones: 100/0 ($M_{100/0}$); 50/50 ($M_{50/50}$); 60/40 ($M_{60/40}$); 70/30 ($M_{70/30}$); 80/20 ($M_{80/20}$); 90/10 ($M_{90/10}$) y 0/100 ($M_{0/100}$). Para esto, los materiales se colocaron en un vaso precipitado de 100 mL, y se agitaron

vigorosamente con una varilla de vidrio. Las mezclas obtenidas fueron caracterizadas mediante el Índice de Fluidez y por Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR), tal como se describe a continuación [1].

La determinación del índice de fluidez (MFI), se realizó en el Laboratorio de Polímeros del Instituto Universitario de Tecnología de Valencia, en un equipo CEAST MeltFlow Junior P/N 6943.000, empleando el procedimiento establecidos en la Norma ASTM D 1238-13 [9]. El equipo posee un indizador de fusión manual para hacer los cortes del material a intervalos de tiempo, los cuales son pesados en una balanza analítica para determinar el MFI. En la Tabla 1 se muestran las condiciones del equipo según el índice de fluidez que se espera obtener, de acuerdo al valor teórico de los constituyentes de la mezcla. Esta prueba, se realizó por triplicado para cada mezcla y los resultados fueron procesados mediante la técnica estadística 2.5D. La determinación del índice de fluidez (MFI), se realizó en el Laboratorio de Polímeros del Instituto Universitario de Tecnología de Valencia, en un equipo CEAST MeltFlow Junior P/N 6943.000, empleando el procedimiento establecidos en la Norma ASTM D 1238-13 [9]. El equipo posee un indizador de fusión manual para hacer los cortes del material a intervalos de tiempo, los cuales son pesados en una balanza analítica para determinar el MFI. En la Tabla 1 se muestran las condiciones del equipo según el índice de fluidez que se espera obtener, de acuerdo al valor teórico de los constituyentes de la mezcla. Esta prueba, se realizó por triplicado para cada mezcla y los resultados fueron procesados mediante la técnica estadística 2.5D.

Para la obtención de los espectros infrarroja de las mezclas preparadas se utilizó en un equipo SHIMADZU modelo FTIR-8400S del Laboratorio de Instrumentación de la Facultad de Ciencias y Tecnología (FACYT) de la Universidad de Carabobo. Para esto, se siguió el procedimiento establecido en la Norma ASTM E821 [10], y se prepararon por disolución películas delgadas de las muestras. Los resultados obtenidos en estas pruebas, fueron empleados para seleccionar la proporción de las mezclas preparadas, con la cual

Tabla 1: Condiciones del equipo según el índice de fluidez teórico.

MFI g/(10 min)	P_{re} g	t_c min
0,15 a 10	2,5 a 3,0	6,00
>1,0 a 3,5	3,0 a 5,0	3,00
>3,5 a 10	4,0 a 8,0	1,00
>10 a 25	4,0 a 8,0	0,50
>25 a 50	4,0 a 8,0	025

t_c : Tiempo de corte.

P_{re} : Peso recomendado de la muestra en el barril.

se realizó los ensayos posteriores.

Para determinar el efecto de un agente compatibilizante sobre el índice de fluidez de la mezcla seleccionada, se utilizó DOP (Ftalato de 2-etil-hexilo), en proporciones de 2,5 %, 5,0 % y 7,5 %. Esta prueba, se realizó por triplicado y los resultados fueron procesados mediante la técnica estadística 2.5D. Esto permitió, establecer la mezcla de PLA/PS/DOP que se utilizó en los ensayos de impacto, dureza y tensión, tal como se describe a continuación.

Para llevar a cabo los ensayos de impacto, dureza y tensión se preparó una lámina de la muestra en estudio. Para esto, se utilizó un equipo Carver el cual consta de una prensa de calentamiento modelo 6051000 serial 17807, en donde se colocó la muestra sólida entre placa metálica de 3mm de espesor que actúan como molde. Luego, se aplicó presión y se aumentó la temperatura hasta fundir el material. Las condiciones establecidas para la preparación de las láminas de las diferentes mezclas se muestran en la Tabla 2.

Obtenidas las láminas se procedió a cortarlas, para esto se utilizó una cortadora CEAST, siguiendo lo establecido en la Norma respectiva para la elaboración de probeta según el ensayo que se realizó. En este sentido, para la prueba de impacto se usó la Norma Técnica ASTM D 656-04, método entandar para determinar la resistencia al impacto en plásticos utilizando péndulo izod. En tanto que, para la prueba de tensión se utilizó la Norma Técnica ISO 527-2. De cada lámina se cortaron tres probetas con el troquelado y ejerciendo presión con una palanca sobre las láminas.

Para el ensayo de Impacto, las probetas obtenidas fueron sometidas a la prueba de Dureza, en un equipo Ceast modelo 6963 serial 17382, siguiendo el procedimiento establecido en la Norma ISO 13802; ISO 179-2 y la ASTM D 256. Este equipo posee una velocidad de impacto de 3,46m/s, una energía potencial de 2,75 J, un ángulo inicial de 150° y una longitud de 0,3268m.

Para el ensayo de tensión, se utilizó una máquina modelo CEAST controlado por un programa llamado NEXYGEN plus. Los parámetros establecidos para la prueba fueron: la longitud de la extensión de 100mm, la longitud, el ancho y espesor de la probeta según la Norma ISO 527-2 se establecieron en 40mm, 5mm y 3mm. Luego se colocó la probeta en el soporte y se le pulsó STAR al programa para dar inicio al ensayo. La prueba finalizó cuando la probeta se fracturó. El programa generó una gráfica de esfuerzo en función de la extensión.

El ensayo de dureza, se realizó en un Durómetro para plásticos Modelo 306L Tipo A que sigue los parámetros establecidos en la Norma ASTM D2240, el cual se basa en la penetración de un indentador específico cuando se presiona el material con el mismo. Para esto, se realizaron medidas de cada una de las probetas utilizadas tanto para en el ensayo de tensión como en la prueba de impacto, en tres puntos de cada probeta. En el caso de las probetas de impacto se colocó el indentador en el centro y en los extremos de la misma y en el caso de las probetas para tensión se colocó el indentador en la zona de fractura específicamente en los extremos y en el centro. En la Figura 1 se muestran los lugares donde se tomaron las medidas.

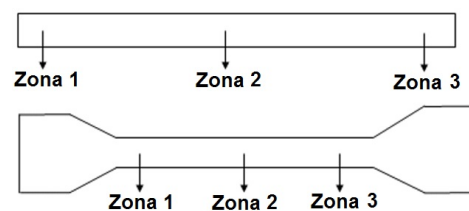


Figura 1: Zonas de las probetas donde se aplicó el ensayo de dureza.

Tabla 2: Condiciones empleadas en el proceso de elaboración de probetas de los distintos materiales.

Material	Masa (g)	Temperatura ±3 °C	t_i ±0,01 s	\bar{t} ±0,01 s	t_f ±0,01 s	P_i ±250 psi	\bar{P} ±250 psi	P_f ±250 psi
PLA	45	170,0	180,00	10,00	30,00	0	2500	3000
PS	45	170,0	45,00	10,00	20,00	0	3500	4000
PLA/PS	45	170,0	180,00	10,00	25,00	0	2000	2500
PLA/PS/DOP	45	170,0	180,00	10,00	25,00	0	2000	2500

t_i : Tiempo inicial.
 P_i : Presión inicial.

\bar{t} : Tiempo promedio.
 \bar{P} : Presión promedio.

t_f : Tiempo final.
 P_f : Presión final.

3. Resultados y discusión

El método de mezclado directo utilizado para preparar las mezclas de poliestireno (PS) con ácido poliláctico (PLA) resultó adecuado, debido a que los valores de índice de fluidez (MFI) obtenidos se encuentran en el rango intermedio de los índices de los polímeros puros. Es de resaltar, que a medida que se aumenta la proporción de ácido poliláctico en las mezclas, el índice de fluidez se incrementa, esto implica que la viscosidad disminuye, tal como se muestra en la Tabla 3. Este comportamiento fue similar al reportado por algunos autores [11].

Tabla 3: Índice de fluidez de las muestras analizadas.

Muestra	MFI ± 2,0 g/(10 min)
Ácido Poliláctico	9,8
$M_{50/50}$	3,8
$M_{60/40}$	4,3
$M_{70/30}$	4,7
$M_{80/20}$	5,3
$M_{90/10}$	6,6
Poliestireno	0,5

El índice de fluidez del Ácido Poliláctico fue de $9,8 \pm 2,0$ g/(10 min). En tanto que, el del poliestireno fue de $0,5 \pm 2,0$ g/(10 min). Estos valores difieren de los reportados por diversos autores [12, 13], debido a que en las formulaciones de PLA existen muchas discrepancias en los valores de índice de fluidez [14], y que el PS utilizado fue obtenido de bandejas comerciales, por lo que los aditivos que contiene influyen en la variación

observada. En este sentido, Aranzazu y Rojas, en el año 2015, reportaron valores de índice de fluidez para el PLA entre 14,20 g/(10 min) y 24,70 g/(10 min), y de 3,55 g/(10 min) para el PS [15]. En tanto, que Álvarez, en el año 2013, señaló un valor de 114,17 g/(10 min) para el PLA [11]. Sánchez, en el año 2004, reportó un valor de 4,17 g/(10 min) para el PS [16]. Estos resultados, indican que el PLA fluye con mayor facilidad que el PS. Por lo que, este último requiere de mayor esfuerzo mecánico para fluir, lo que lo hace un material con mejores propiedades mecánicas que el PLA.

Es de hacer notar, que diversos autores han señalado que el índice de fluidez (MFI) puede ser utilizado como una herramienta de control de calidad y que además es una medida utilizada en la fabricación de polímeros, ya que es una característica fundamental de las resinas poliméricas, que depende inversamente del peso molecular, así como, también del número, clase y distribución de las ramificaciones. Es decir, es una medida del esfuerzo mecánico que requiere o no una muestra polimérica para fluir. Es por esta razón, que el índice de fluidez puede ser relacionado como un parámetro que indique las propiedades mecánicas que posea un material polimérico [17, 12, 13].

En cuanto, a la variación del MFI de las muestras preparadas a medida que se incrementa la cantidad de PLA, esto indica que la cantidad de Poliestireno aporta menos flexibilidad y menos fluidez a la mezcla, lo que implica un aumento en esfuerzo mecánico para fluir. Este comportamiento concuerda con lo reportado por algunos autores

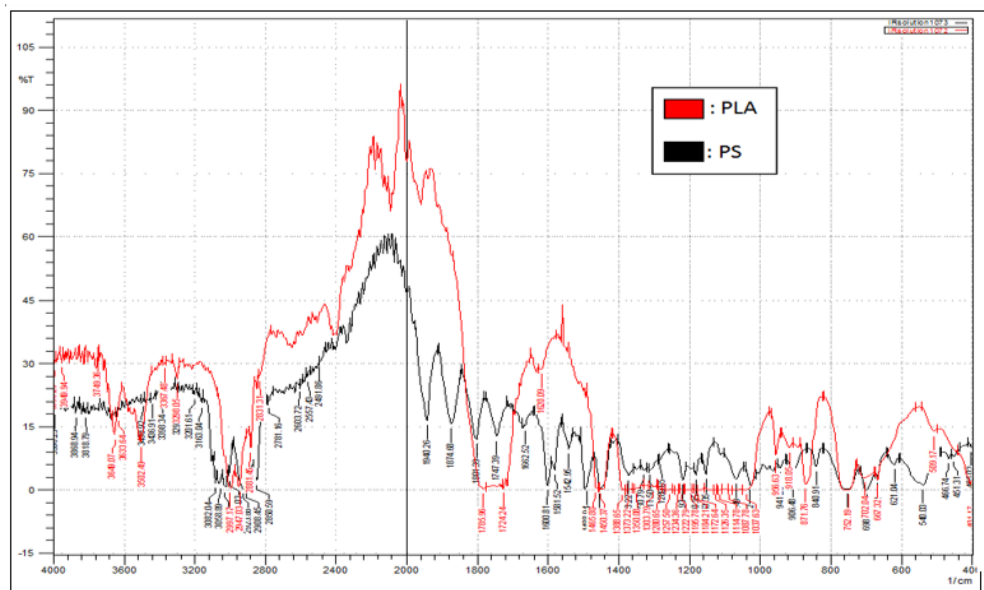


Figura 2: Espectros Infrarrojos del ácido poliláctico y el poliestireno.

[11].

En la Figura 2 se muestra el espectro infrarrojo obtenido para el ácido poliláctico y el poliestireno. Para el PLA (ácido poliláctico), se observa que entre las longitudes de onda de $1743,53$ y $1785,96 \text{ cm}^{-1}$ respectivamente, se evidencia una banda estrecha la cual corresponde a la vibración stretching del grupo carbonilo de éster. La banda larga ubicada entre 1050 y 1350 cm^{-1} respectivamente, tiene una intensidad bastante baja y es debido a la presencia característica de $-C-O-$, ya que la longitud de onda evidenciada alrededor de $1087,78$ y $1222,79 \text{ cm}^{-1}$ respectivamente, se debe a una vibración stretching simétrica $-C-O-$, mientras que alrededor de $1126,35 \text{ cm}^{-1}$ ocurre una tensión asimétrica del mismo grupo. Por otro lado, la banda ubicada alrededor de $1373,22 \text{ cm}^{-1}$ es causada por una deformación simétrica del grupo $-CH_3$ y en $1450,80 \text{ cm}^{-1}$ se genera una longitud de onda debida a una vibración bending de los grupos $-CH_3$ y $-CH$, estos mismos grupos generan una vibración stretching en $2997,17$ y $2947,03 \text{ cm}^{-1}$ respectivamente. Por su parte a una longitud de 956 cm^{-1} se genera una banda por vibración a modo de balanceo del $-CH_3$. Las bandas descritas anteriormente concuerdan las reportadas para el PLA por diversos autores [18, 19].

En cuanto, al espectro infrarrojo del poliestireno

se observa que presenta una banda larga debido a una vibración stretching entre $3028,03$ y $2908,45 \text{ cm}^{-1}$ respectivamente de los grupos $-CH_3$ y $-CH$ del grupo aromático del compuesto, mostrando banda corta en $1600,81 \text{ cm}^{-1}$ la cual es una flexión del grupo $-OH$, apreciándose $1453,23 \text{ cm}^{-1}$ otra vibración stretching debido a una flexión de los grupos $-CH_3$ y $-CH$. Por otro lado en $1218,20 \text{ cm}^{-1}$ se ha de notar una vibración stretching simétrica $-C-O$ y en $1180,36 \text{ cm}^{-1}$ una banda corta por una tensión asimétrica del grupo antes mencionado. Cada una de estas bandas corresponde a las reportadas por algunos autores [20].

En la Figura 3 se muestra los espectros infrarrojos de las mezclas preparadas. En ella, se observa que las mezclas $M_{50/50}$ y $M_{60/40}$ presentan intensidades, y longitudes de ondas similares, se evidencia en ambos casos que la banda alrededor de los 3000 cm^{-1} , la cual es causada por el estiramiento de los grupos $-CH_3$ y $-CH$, no se encuentra tan definida y es ancha. Además se aprecia claramente que a partir de 3000 cm^{-1} al aumentar la longitud de onda, la intensidad es baja respecto a los polímeros puros, alrededor de un 4 % lo cual indica que si existieron interacciones entre los polímeros. A su vez las longitudes entre 1050 y 1350 cm^{-1} ocasionadas por $-C-O-$ aumentan su intensidad. Por su parte la banda característica del

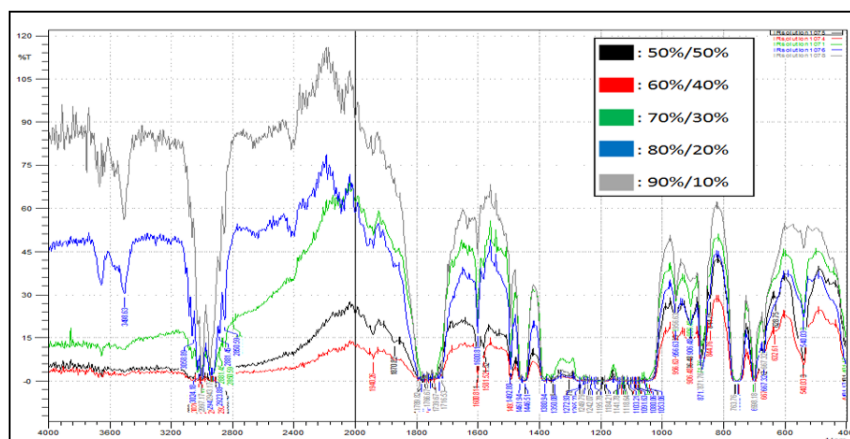


Figura 3: Espectros infrarrojos de las mezclas de ácido poliláctico y poliestireno.

grupo carbonilo del PLA se puede ver alrededor de $1770,53\text{ cm}^{-1}$ y la del PS alrededor de $3024,18$ y $2904,60\text{ cm}^{-1}$ respectivamente.

Por su parte, las mezclas $M_{70/30}$, $M_{80/20}$ y $M_{90/10}$ presentan características diferentes que las analizadas anteriormente, destacando que entre estas, las últimas dos muestran similitud. Se evidencia que a partir de 3000 cm^{-1} al aumentar la longitud de onda, la intensidad se incrementa, y se ubica alrededor de 60% de intensidad. De igual manera se observa que las bandas características del PLA y del PS, desplazadas respecto a las apreciadas en los polímeros puros. Dichas variaciones ocurridas en cada una de las mezclas se deben a las interacciones entre los grupos funcionales tanto del poliestireno como del ácido poliláctico, lo cual hace notar que la mezcla tuvo cierta miscibilidad, es decir, se establecieron diversas interacciones entre los grupos funcionales de los materiales poliméricos lo cual ocasiona un desplazamiento en las bandas características de los polímeros puros. En este sentido, diversos autores señalan que en mezclas miscibles o parcialmente miscibles de polímeros pueden observarse cambios significativos en la intensidad y/o frecuencia de las bandas [21].

En virtud de los señalamientos anteriores, se establece que la mezcla $M_{50/50}$ fue la que presentó el mejor comportamiento mecánico. Por lo tanto, fue la mezcla seleccionada para continuar con los ensayos planteados en esta investigación.

En la Tabla 4 se muestran los valores de

Tabla 4: Índice de fluidez de las mezclas preparadas con DOP.

Muestra	MFI $\pm 0,08\text{ g}/(10\text{min})$	Variación, %
$M_{50/50}$	3,85	0,00
$(M_{50/50})_{2,5}$	3,24	-15,84
$(M_{50/50})_5$	3,81	-1,04
$(M_{50/50})_{7,5}$	5,99	+55,58

índice de fluidez de la muestra preparada con 50%PLA y 50%PS. Así como, de las muestras con 2,50% ($(M_{50/50})_{2,5}$), 5,00% ($(M_{50/50})_5$) y 7,50% ($(M_{50/50})_{7,5}$) de ftalato de di-2-etil-hexilo (DOP). En ella, se observa que la incorporación del 2,5% de plastificante a la mezcla seleccionada ocasiona una disminución del MFI del 15,84%. En tanto, que este valor disminuye en 1,04% cuando se le añade 5,00% de plastificante y aumenta en 55,58% con 7,50% de DOP. Estos resultados indican, que al aumentar la cantidad del plastificante se incrementa su fluidez. Esto concuerda con lo señalado por diversos autores; quienes indican que los plastificantes de bajo peso molecular se agregan principalmente para aumentar la flexibilidad, procesabilidad y elongación del polímero, lo que mejora las propiedades mecánicas al reducir su fragilidad del mismo [22, 23, 24].

Por su parte, se obtuvo que la adición de pequeñas cantidades de plastificantes generó un efecto contrario al de la plastificación. En este caso, al añadir 2,50% del plastificante se produce

un efecto de antiplastificación, el cual se le atribuye al bloqueo de movimientos moleculares a causa de las interacciones polímero-plastificante, al ordenamiento de las cadenas y al aumento de la cristalinidad producido por el plastificante [25, 26].

Tabla 5: Propiedades mecánicas de las mezclas analizadas.

Muestra	H_{ShA}	$R_{imp} \text{ J/m}^2$	$R_{ten} \text{ MPa}$
PLA	90,8	135,64	27,67
$M_{50/50}$	92,0	69,19	7,23
$(M_{50/50})_{2,5}$	93,3	43,19	2,90
PS	94,0	22,30	3,08

H_{ShA} : Dureza Shore A.

R_{imp} : Resistencia al impacto.

R_{ten} : Resistencia a la tensión.

En la Tabla 5 se muestran los resultados obtenidos en las pruebas mecánicas realizadas a los matriles en estudio. En ella se observa, que el Poliestireno presentó la mayor dureza, con un valor de 94,0. En tanto, que el PLA mostró una dureza de 90,0. Por su parte, las mezcla $M_{50/50}$ sin plastificante de 92,0 y con plastificante de 93,3. Estos resultados, corroboran lo señalado anteriormente sobre el método de mezclado empleado en la preparación de las mezclas, el cual generó una adecuada combinación de los materiales a obtener valores de dureza en el rango intermedio de los polímeros puros. Es de resaltar, que la incorporación de DOP a la mezcla incrementó la dureza del material. Esto indica, que el material presenta buena resistencia a la penetración y al rayado, lo que evidencia que el efecto de antiplastificación ocasionado mejora las propiedades mecánicas de la mezcla [1].

El efecto de antiplastificación que se presenta a añadir pequeñas cantidades de DOP a la mezcla en estudio, se pone de manifiesto nuevamente en las pruebas de resistencia al impacto y resistencia a la tensión. En la primera prueba el PLA presentó un valor de $135,64 \text{ J/m}^2$, mientras que el PS de $22,30 \text{ J/m}^2$. Esto indica, que el PS es un material frágil y rígido en comparación con el PLA, tal como lo corroboran algunos autores [15, 16]. En cuanto a, la mezcla sin DOP el valor de resistencia

al impacto fue de $69,19 \text{ J/m}^2$, mientras que con DOP fue de $43,19 \text{ J/m}^2$. Esto indica, que la mezcla con DOP es frágil y rígida, con valores que se acercan al comportamiento obtenido con el Poliestireno [1].

En cuanto, a la resistencia a la tensión el PLA presentó un valor de 27,67 MPa, mientras que el PS de 3,08 MPa. Estos resultados, señalan el PLA es un material blando y flexible, por lo que se requiere de mayor esfuerzo para que este se rompa, en comparación al PS [27]. En cuanto a, la mezcla sin DOP el valor obtenido fue de 7,23 MPa, mientras que con DOP fue de 2,90 MPa. Esto, afirma que al agregar una proporción baja de DOP hace resistencia a la tensión disminuya debido al efecto señalado anteriormente.

4. Conclusiones

El método de mezclado directo utilizado para preparar las mezclas de poliestireno (PS) con ácido poliláctico (PLA) resultó adecuado, debido a que los valores de las propiedades mecánicas analizadas se encuentran en el rango intermedio de los valores de los polímeros puros. La mezcla 50%PLA/50%PS fue la que tuvo el menor índice de fluidez, por lo que se consideró como la mezcla con mejor comportamiento mecánico. Los desplazamientos de las bandas en los espectros infrarrojos indican que existen ciertas interacciones entre los constituyente de las mezclas, asociados a la miscibilidad de los mismos. La incorporación de 2,5% en DOP a la mezcla ocasiona un efecto antiplastificación, lo que produce un material con propiedades mecánicas adecuado para su uso.

Agradecimientos

Al FONACIT por el financiamiento recibido a través del proyecto N° 2011001269, el cual permitió sufragar parte de los costos involucrados para la realización de este trabajo. Al personal docente y técnico que labora en el Laboratorio de Polímeros del Centro de Investigaciones Químicas, en el Laboratorio de Ingeniería Química (LIQ) de la Facultad de Ingeniería, en el Laboratorio de Instrumentación de la Facultad de Ciencias y Tecnología (FACYT) de la Universidad de

Carabobo y a los que laboran en el Laboratorio de Polímeros del Instituto Universitario de Tecnología de Valencia (IUTVAL) por su apoyo en el desarrollo de esta investigación.

5. Referencias

- [1] P. Cedeño and R. Heras. Comportamiento mecánico y térmico de mezclas de ácido poliláctico (PLA) con poliestireno (PS). Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2016.
- [2] Magda Elva Perales Castro. Modificación estructural del polietiléntereftalato con ácido poliláctico. síntesis de polímeros biodegradables. Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, México, 2012.
- [3] Maribel Herryman Munilla and Gladys Blanco Carracedo. Ácido láctico y poliláctico: Situación actual y tendencias. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, XXXIX(1):49–59, 2005.
- [4] Juana Suhey Ponce Hernández. Estudio de propiedades y compatibilidad de mezclas de polipropileno (pp), ácido poliláctico (pla) y nanopartículas de óxido de silicio (SiO₂), mediante extrusión y mezclado físico. Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, México, 2014.
- [5] Girma Biresaw and C. J. Carriere. Compatibility and mechanical properties of blends of polystyrene with biodegradable polyesters. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 35:313–320, 2004.
- [6] Balázs Imre and Béla Pukánszky. Compatibilization in bio-based and biodegradable polymer blends. *European Polymer Journal*, 49(6):1215–1233, 2013.
- [7] Angélica M. Grillo Nerio. Cristalización de la poli (ϵ -caprolactona) en mezclas poli (d,l ácido láctico)/pcl degradadas en medio ácido. Trabajo Especial de Grado, Universidad Simón Bolívar, Venezuela, 2007.
- [8] Sandra Karina Mascarenas Espino. *Estudio del efecto compatibilizante del copolímero san en mezclas de PVC/ABS*. Tesis Doctoral, Instituto Politécnico Nacional, México, 2008.
- [9] ASTM D1238-13(2013), standard test method for melt flow rates of thermoplastics by extrusion plastometer, 2013.
- [10] ASTM E821-16(2016), standard practice for measurement of mechanical properties during charged-particle irradiation, 2016.
- [11] Elvira Castellanos Álvarez. Formulación de polímeros biodegradables HDPE-PLA mediante molienda mecánica y extrusión. Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, México, 2013.
- [12] Adriana B. Guajardo, Laura E. Najar, Susana B. Prósperi, and María G. Molina. Propiedades de los plásticos reciclados. In *Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 26 (AIDIS 98), pages 1–13. APIS, 1998.
- [13] Rubén Eduardo Alarcón Salas. Estudio de la relación entre la estructura, PIAT, grado de cura y resistencia al impacto en productos monocapa de polietileno rotomoldeado. Trabajo Especial de Grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador, 2007.
- [14] Alfonso Reyes Quezada. Obtención de los parámetros de sellado de un empaque resellable. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2012.
- [15] A. F. Rojas and L. M. Aranzazu. Estabilidad de procesamiento de polímeros: índice de degradación en proceso. *Revista Mutis*, 5(1):37–45, 2015.
- [16] Angel López Sánchez. *Influencia del proceso de reciclado sobre las propiedades de los materiales compuestos obtenidos por inyección de poliestireno reforzado con fibras lignocelulósicas*. Tesis Doctoral, Universitat de Girona, España, 2004.
- [17] Andrés F. Rigail-Cedeño. Aplicaciones del melt flow index (MFI) en la industria de procesamiento de plásticos. *Revista Tecnológica-ESPOL*, 19(1):79–84, 2006.
- [18] Pablo Jiménez Bonilla, María Sibaja Ballester, and José Vega-Baudrit. Síntesis y caracterización de poli(ácido l-láctico) por policondensación directa, obtenido del fermento de desechos agroindustriales de banano (*musa acuminata* aaa variedad *cavendish* cultivar *gran naine*) en Costa Rica. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 13(2):52–59, 2012.
- [19] Lucila Araceli Montero Palacios. *Métodos físico-químicos de caracterización de las fibras de polilactida*. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, España, 2012.
- [20] M. D. Samper, M. I. Rico, S. Ferrandiz, and J. López. Reducción y caracterización del residuo de poliestireno expandido. In *I Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*, Castellón, 2008.
- [21] Vittoria Balsamo, Laura M. Gouveia, Lenin Herrera, Estrella Laredo, and Bernardo Méndez. Miscibilidad en mezclas de poli (estireno-co-anhídrido maleico) y poli (ϵ -caprolactona)(SMA/PCL). *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 24(1-2):17–30, 2004.
- [22] Oscar Yesid Suárez Palacios. *Producción y modelamiento de gliceril-ésteres como plastificantes para PVC*. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2011.
- [23] F. Billmeyer. *Ciencia de los polímeros*. Editorial Reverté, España, 2^{da} edición, 1978.
- [24] D. Sojo. Optimización de formulaciones de PVC para aplicaciones de cables comercializadas por Gravinil S.A. Trabajo Especial de Grado, Universidad Simón Bolívar, Venezuela, 2009.
- [25] Pilar Tiemblo Magro. *Microestructura molecular y propiedades físicas del PVC: nuevas correlaciones con configuraciones locales terminales de secuencias tácticas*. Tesis Doctoral, Universidad Complutense de

Madrid, España, 1994.

- [26] Lorena Hoyos Madrigal. Caracterización térmica, mecánica y de sorción de sistemas de almidón de yuca y aceite de maíz. Tesis de Maestría, Universidad Simón Bolívar, Venezuela, 2010.
- [27] Jorge Armando Tello González. Estudio de las propiedades mecánicas de bioplástico que contiene ácido poliláctico mediante pruebas de intemperismo. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma del Estado de México, México, 2017.