

Evaluación de las propiedades mecánicas en mezclas de Poliestireno/Polietileno de baja densidad reciclado y tamizado

E.A. Franco-Urquiza* y Maspoch M.LI.²

¹Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACyT, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial. Playa Pie de la Cuesta 702, Desarrollo San Pablo, Querétaro,

México. 76125. ²Centre Català del Plàstic, Universitat Politècnica de Catalunya. Edifici Vapor Universitari de Terrassa, carrer Colom 114, Terrassa, Spain, 08222.

Evaluation of the mechanical properties in recycled and sieved low density polystyrene / polyethylene blends

Avaluació de les propietats mecàniques en mesclades de Poliestirè/Polietilè de baixa densitat reciclat i tamisat

SUMMARY

The present work details on blends of polystyrene (PS) with recycled and sieved low density polyethylene (LDPE) from electric cables. The blends were prepared in a pilot plant extrusion using a single-screw extruder. The mixtures, with nominal concentrations of 5, 7.5, 15, 25 and 35 wt. % of recycled LDPE, were tested under tensile and flexural configurations. The mechanical evaluation was performed according to the recycled content and the number of extrusion steps. In both mechanical test configurations a decrease in stiffness and strength was observed by adding the recycled LDPE, although the PS ductility was favored, which was attributed to the intrinsic nature of materials. The observations on the specimen surfaces by optical microscopy revealed the agglomeration of the recycled LDPE inside the PS matrix, observing two distinct and very well defined phases. A second step of single screw extrusion allowed to improve the dispersion of the recycled LDPE into PS, increasing the ductility of the reprocessed mixtures without altering the stiffness and the strength.

Keywords: Recycled polymers; single-screw extrusion; mechanical properties.

RESUMEN

En el presente trabajo se prepararon mezclas de poliestireno (PS) con residuo tamizado de Polietileno de baja densidad (LDPE) reciclado de cables eléctricos. Las mezclas se prepararon utilizando una línea de extrusión mono-husillo a nivel planta piloto. Las mezclas, con concentraciones nominales de 5, 7.5, 15, 25 y 35 % en peso de residuo, fueron ensayadas bajo las configuraciones a tracción y a flexión. La evaluación mecánica se realizó en función del contenido de residuo y del número de pasos por extrusión mono-husillo. En ambas configuraciones de ensayo se observó una disminución de la rigidez y la resistencia del PS al añadir el residuo de LDPE, aunque la ductilidad del PS se vio favorecida, lo cual se adjudicó a la naturaleza intrínseca de ambos materiales. Las observaciones realizadas sobre la superficie de rotura de las mezclas permitieron apreciar la aglomeración del residuo dentro del PS, observándose dos fases distintas y muy bien definidas. Un segundo paso por extrusión mono-husillo permitió mejorar la dispersión del residuo dentro del PS, aumentando la ductilidad de las mezclas reprocesadas sin afectar la rigidez y la resistencia.

Palabras clave: Reciclado de polímeros; extrusión mono-husillo; propiedades mecánicas.

RESUM

En el present treball es van preparar mesclades de poliestirè (PS) amb residu tamisat de Polietilè de baixa densitat (LDPE), reciclat de cables elèctrics. Les mesclades es van preparar utilitzant una línia d'extrusió mono-cargol a nivell de planta pilot. Les mesclades, amb concentracions nominals de 5, 7.5, 15, 25 i 35% en pes de residu, van ser assajades sota les configuracions a tracció i a flexió. L'avaluació mecànica es va realitzar en funció del contingut de residu i de

nombre de passos per l'extrusió mono-cargol. Amb les dues configuracions d'assaig es va observar una disminució de la rigidesa i la resistència del PS en afegir el residu de LDPE, encara que la ductilitat del PS es va veure afavorida, la qual cosa es va adjudicar a la naturalesa intrínseca de tots dos materials. Les observacions realitzades sobre la superfície de trencament de les mescles van permetre apreciar l'aglomeració del residu dins del PS, observant dues fases diferents i molt ben definides. Un segon pas per l'extrusió mono-cargol va permetre millorar la dispersió del residu dins del PS, augmentant la ductilitat de les mescles processades de nou, sense afectar la rigidesa i la resistència.

Paraules clau: Reciclatge de polímers; extrusió mono-cargol; propietats mecàniques.

INTRODUCCIÓN

Los plásticos son materiales de bajo costo, ligeros y de fácil moldeo para desarrollar una variedad de productos con una amplia gama de aplicaciones, por lo que su producción ha aumentado notablemente en las últimas décadas, generando varios problemas ambientales. Según la US Energy Information Administration¹, alrededor del 5 por ciento del petróleo mundial se utiliza como materia prima para plásticos; mientras que otro 3-4% de la producción de gas, un recurso no renovable, se gasta para proporcionar la energía necesaria para su fabricación. Una parte considerable de los plásticos producidos cada año se utiliza para fabricar artículos como envases desechables u otros productos de corta vida, los cuales se desechan dentro del mismo año de su fabricación, lo que indica que el uso actual de los plásticos no es sostenible. China, con el 26%, es el mayor productor de materiales plásticos, seguido por Europa con un 20% y Norte América con el 19% de producción². El sector del envase y embalaje es el sector de mayor consumo, representando un 39.5% de la producción total de plásticos a nivel mundial, seguido por el sector de la construcción con un 20.1%².

En la actualidad, el reciclaje de plásticos es una de las acciones más importantes para reducir los impactos ambientales, y representa una de las áreas más dinámicas de la industria del plástico. El reciclaje de los plásticos ofrece oportunidades para reducir el uso de petróleo, las emisiones de dióxido de carbono y las cantidades de residuos que hay que eliminar.

Existen tres métodos principales para el reciclado de residuos plásticos: *el reciclado químico*, que consiste en recuperar los componentes petroquímicos del polímero^{3,4,5}; *la recuperación de energía*, que se utiliza para la recuperación energética en el plástico mediante la incineración⁶⁻⁸ y *el reciclado mecánico*, que es el método de mayor interés industrial, ya que es relativamente fácil y económico al emplear un proceso físico como la extrusión⁹⁻¹¹.

El reciclado mecánico tiene como objetivo reutilizar los residuos plásticos a través de distintos pasos como: la molienda, el lavado, la separación, el secado y la transformación del residuo en un material reutilizable, a menudo sustituyendo los plásticos vírgenes. No obstante, las propiedades mecánicas de éstos materiales plásticos reciclados no son espectaculares; y, por tanto, no son comparables a las de un polímero que no ha sufrido una excesiva degradación térmica durante el reprocesado ni ha sido expuesto a la radiación ultravioleta durante su vida útil¹²⁻¹⁵.

El reciclaje mecánico se utiliza principalmente para mezclar diversos polímeros termoplásticos. Sin embargo, no todos los polímeros son miscibles entre sí¹⁶⁻¹⁸, lo que significa que una mezcla de diferentes polímeros termoplásticos puede resultar con propiedades mecánicas limitadas, aunque existen mercados en los cuales los productos no requieren elevadas exigencias mecánicas siempre que estas mezclas poliméricas cumplan unos estándares mecánicos mínimos para su correcto funcionamiento.

El poliestireno (PS) es un plástico versátil que se utiliza para fabricar una amplia variedad de productos de consumo debido a su resistencia, ligereza, durabilidad y bajo precio. El PS se utiliza a menudo en productos que requieren claridad o transparencia, tales como el envasado de alimentos y los materiales de laboratorio. Además, el poliestireno se utiliza para fabricar electrodomésticos, aparatos electrónicos, partes de automóviles, juguetes, accesorios de jardinería, etc. Cuando el PS se utiliza en forma expandida, es posible producir diversos productos como bolígrafos, mobiliario, espuma de embalaje y placas aislantes para el sector de la construcción.

En un trabajo anterior¹⁹ se compararon las propiedades mecánicas de mezclas LDPE/residuos provenientes de cables eléctricos, evaluando la influencia del contenido de residuo. En ese estudio se concluyó la necesidad de tamizar el residuo para reducir el tamaño de las partículas de residuo, obteniendo un mezclado homogéneo de los extruidos.

El presente trabajo de investigación forma parte de una serie de artículos científicos que se han escrito para divulgar la estrategia del reciclado mecánico sobre las propiedades mecánicas de polímeros reciclados de cara a su adaptación a nivel industrial^{19,20}.

El objetivo del presente estudio es evaluar las propiedades mecánicas de mezclas PS/residuo de LDPE reciclado utilizando una línea de extrusión planta piloto. La evaluación mecánica de las mezclas está en función del contenido de residuo, el cual es tamizado para conseguir partículas de tamaños pequeños y obtener un mezclado homogéneo durante la extrusión.

MATERIALES

En este trabajo se utilizó el PS Polystyrol 165H suministrado por BASF. El polystyrol es un poliestireno de uso general en extrusión, con una densidad de 1.05 g/cm³, un módulo elástico de 3.3 GPa, una resistencia a la tracción de 52 MPa, una resistencia a la flexión de 86 MPa y una deformación a rotura del 2 % aproximadamente.

Para las mezclas se utilizó un residuo proveniente de cables eléctricos, el cual fue suministrado por una empresa

autorizada de gestión de residuos de cable eléctrico con sede en Catalunya, España. Según esta empresa, la composición en peso de éste residuo puede llegar a ser de: 60% PVC, 30% LDPE, 9% goma y 1% fracción metálica.

MÉTODOS EXPERIMENTALES

Los cables eléctricos se constituyen básicamente de un alma conductora (alambre de cobre o aluminio) y un aislante (mezcla de PVC, LDPE y elastómeros). Durante el proceso de reciclado, lo primero que se retira es el material conductor debido a su elevado valor comercial. No obstante, siempre quedan restos de metal que deben ser eliminados del residuo previo al proceso de mezclado.

En este trabajo, la separación de la fracción metálica contenida en el residuo se llevó a cabo de forma manual. Una vez retirado el metal, la recuperación de LDPE se realizó mediante el método de separación por diferencia de densidades. Para ello, el residuo libre de metal se colocó dentro de un vaso de precipitado y se utilizó agua ($\rho = 1 \text{ gr/cm}^3$) como medio de suspensión. Una vez obtenido el residuo de LDPE (R_{LDPE}), se realizó una separación granulométrica utilizando tamices de la marca W. S. Tyler. El tamaño de malla de los tamices seleccionados fue de 1.68 y 0.59 mm. Ambos tamices fueron apilados, colocando el R_{LDPE} dentro del tamiz con tamaño de malla de 1.68 mm. Los tamices se sacudieron manualmente para que las partículas de tamaño inferior al malla pasaran a través de él, obteniendo un tamaño de partículas de residuo muy homogéneo $0.59 < R_{LDPE} < 1.68$ mm. Las partículas tamizadas de LDPE que quedaron dentro de ambos tamices (denominadas en este trabajo como R_{LDPE}^*) fueron recogidas y secadas dentro de una estufa con circulación forzada de aire a 80 °C durante 24 h previo al mezclado.

Las mezclas PS/ R_{LDPE}^* , con concentraciones nominales de 5, 7.5, 15, 25 y 35 % en peso de R_{LDPE}^* , se prepararon utilizando una línea de extrusión a escala planta piloto, compuesta de una extrusora mono husillo IQAP-LAP (con una relación L/D de 25 y diámetro de 30 cm), un sistema de enfriamiento por baño de agua, seguida de una banda transportadora, y una máquina de granulación. La velocidad de rotación del husillo de la extrusora fue de 30 rpm, mientras que el perfil de temperaturas estuvo comprendido entre 100 °C en la sección de alimentación y 160 °C en la boquilla.

Para obtener las probetas de tracción normalizadas, las mezclas PS/ R_{LDPE}^* se inyectaron en una máquina de moldeo por inyección Mateu Solè METEOR 70/22, con una fuerza de cierre de 22 toneladas. El perfil de temperaturas de inyección fue desde 185 en la tolva de alimentación hasta 160 °C en la boquilla. La temperatura de la pared del molde se mantuvo en 30 °C. Las mezclas se inyectaron en el molde a una velocidad de inyección de 45 mm³/s con una presión de mantenimiento de 50 bares y un tiempo de mantenimiento de 1 s. Antes de la inyección, los materiales se secaron en una estufa con circulación forzada de aire a 80 °C durante 24 h.

La caracterización mecánica se llevó a cabo mediante ensayos a tracción uniaxial (norma ISO 527) y ensayos a flexión en tres puntos (norma ISO 178) utilizando una máquina de ensayos universales modelo Galdabini Sun 2500, equipada con una celda de carga de 5kN y un videoextensómetro Mintron OS-65D, el cual fue utilizado solamente para los ensayos a tracción. Las probetas se ensayaron a temperatura ambiente ($22 \pm 1^\circ\text{C}$), a una velocidad de separación de mordazas de 5 y 2 mm/min para los ensayos de tracción y flexión respectivamente.

Para el caso de los ensayos a tracción, se obtuvieron las correspondientes curvas esfuerzo vs deformación, a partir de las cuales se determinó el módulo de Young (E), el esfuerzo máximo (s_m) y la deformación a rotura (e_b).

Respecto a los ensayos de flexión, éstos se realizaron utilizando solamente la sección longitudinal de la parte estrecha de las probetas de tracción. De esta manera las dimensiones de las probetas de flexión fueron de 10.6 mm de ancho (b), 4.5 mm de espesor (h) y 91 mm de largo (l). El módulo de flexión, la resistencia y la deformación se determinaron a partir de las siguientes ecuaciones:

$$E_B = \frac{L^3 \cdot m}{4 \cdot b \cdot h^3} \quad (1)$$

$$\sigma_B = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (2)$$

$$\varepsilon_B = \frac{6 \cdot S \cdot h}{L^2} \quad (3)$$

Donde E_B , s_B y e_B corresponden a las propiedades mecánicas referidas al módulo, la resistencia y la deformación en flexión respectivamente. L es la distancia entre apoyos ($L = 16 \cdot h$), m es la pendiente de la tangente de la curva Fuerza vs desplazamiento y S representa la flecha, que es la distancia recorrida en milímetros durante la flexión. En este trabajo, S representa 1.5 veces el espesor h de la probeta. Los valores presentados en este trabajo corresponden al promedio de al menos 10 ensayos válidos.

Las superficies de rotura se observaron en un microscopio estereoscópico (Carton) y las imágenes ópticas fueron capturadas utilizando una cámara digital (ProgRes CT3) adaptada al microscopio.

RESULTADOS

Recuperación de residuo LDPE

La separación de la fracción metálica en el residuo se llevó a cabo manualmente en lotes de 100 g. El contenido de fracción metálica en el residuo fue de aproximadamente 0.8 % en peso, que es un dato muy próximo al valor indicado por el proveedor. Posteriormente, el residuo fue sometido a un proceso de separación por diferencia de densidades, donde la fracción pesada (sumergido en el agua) se consideró estar compuesta de PVC con un porcentaje en peso de 77%. Por su parte, la fracción ligera (R_{LDPE}) se consideró estar compuesta principalmente de LDPE, caucho y otros materiales poco densos, con un porcentaje en peso del 23 %. La fracción de R_{LDPE} se tamizó, obteniéndose solamente un 12% de residuo tamizado (R_{LDPE}^*) con un tamaño de partículas comprendidos entre 0.59 y 1.68 mm aproximadamente. El R_{LDPE}^* se mezcló con PS y se obtuvieron las mezclas descritas previamente.

Propiedades mecánicas: Tracción

La **Figura 1** presenta las curvas tensión vs deformación (σ vs ϵ) obtenidas durante los ensayos a tracción de las mezclas PS/ R_{LDPE}^* .

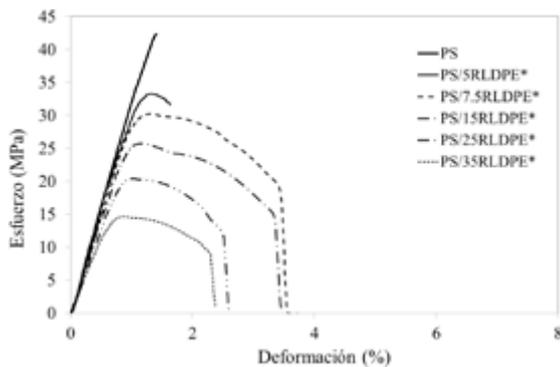


Figura 1: Curvas σ vs ϵ del poliestireno y las mezclas PS/ R_{LDPE}^* ensayadas a tracción.

Tal como era de esperar, el poliestireno presenta una curva de tracción característica de un material frágil, sin registro de una zona de decencia ni región plástica. No obstante, la forma de las curvas σ vs ϵ cambia al añadir el residuo tamizado. Las mezclas PS/ R_{LDPE}^* presentan curvas con dos regiones claramente distintas: una región lineal seguida de una región de decencia y posterior deformación plástica.

Es posible apreciar claramente que la zona de decencia se torna más difusa al incrementar el contenido de residuo. De hecho, dentro de la región plástica se pueden apreciar diversos cambios en función del contenido de R_{LDPE}^* .

En el caso particular de la mezcla PS/5 R_{LDPE}^* , la curva presenta una zona de decencia, pero no desarrolla deformación plástica. Por su parte, la mezcla PS/7.5 R_{LDPE}^* desarrolla una curva con una deformación plástica mayor que el resto de las mezclas, esta ductilidad se ve reducida al aumentar el contenido de residuo.

Es importante considerar que las mezclas PS/ R_{LDPE}^* se conforman de dos materiales totalmente diferentes. Por un lado, el PS es un material amorfo y con un comportamiento frágil; mientras que el LDPE es un material semicristalino y con elevada ductilidad. Por tanto, las mezclas analizadas en este trabajo estarían siendo afectadas por la naturaleza de ambos materiales. Al parecer, con un 5% en peso de residuo, la mezcla es capaz de desarrollar cedencia, pero la naturaleza amorfa del PS impide la deformación plástica. A partir de un 7.5%, las mezclas tienen la capacidad de desarrollar una zona de cedencia y deformación plástica, aunque ésta se ve reducida al incrementar el contenido de residuo, debido a la degradación del material reciclado [19].

La **Tabla 1** presenta las propiedades mecánicas del Módulo de Young, la resistencia máxima y la deformación a rotura del poliestireno y las mezclas preparadas, con la intención de profundizar un poco más en el comportamiento mecánico del poliestireno en función del contenido de residuo.

Tabla 1. Parámetros mecánicos del PS y las mezclas PS/ R_{LDPE}^* obtenidas a través de ensayos a tracción

Material	E (GPa)	σ_{max} (MPa)	ϵ_b (%)
PS	3.2 ± 0.14	42.2 ± 0.83	1.4 ± 0.04
PS/5 R_{LDPE}^*	3.0 ± 0.14	33.2 ± 1.52	1.7 ± 0.20
PS/7.5 R_{LDPE}^*	2.9 ± 0.11	30.3 ± 0.84	3.6 ± 0.23
PS/15 R_{LDPE}^*	2.8 ± 0.08	24.9 ± 1.16	3.3 ± 0.29
PS/25 R_{LDPE}^*	2.6 ± 0.11	18.7 ± 1.23	2.6 ± 0.16
PS/35 R_{LDPE}^*	2.4 ± 0.10	16.1 ± 1.67	2.5 ± 0.28

Tal como era de esperar, la rigidez y la resistencia de las mezclas son notoriamente inferiores a las del poliestireno, y tienden a disminuir conforme el contenido de residuo aumenta. Este comportamiento se atribuye en primera instancia a la presencia del material reciclado dentro del PS, ya que el residuo de LDPE es un material que ha sido

sometido a diversos tratamientos termomecánicos durante su procesado y transformación, así como durante su vida útil, antes de ser reutilizado en este estudio. Por otra parte, es importante considerar que el residuo no es molecularmente compatible con el PS.

En lo que respecta a la ductilidad, el porcentaje de deformación de las mezclas resultó ser mayor al del PS, lo cual se atribuye a la presencia de una fase con elevada ductilidad como es el caso del LDPE²¹.

Para comprender un poco más sobre el comportamiento mecánico de las mezclas, es necesario evaluar el mecanismo de rotura. La **Figura 2** muestra las superficies de rotura de las probetas de tracción del PS y de las mezclas PS/R_{LDPE}*.

El poliestireno presenta transparencia y una zona de rotura tipo espejo, características de los materiales frágiles. En el caso de las mezclas, la transparencia se elimina por la presencia del LDPE reciclado dentro del PS. Además, es posible apreciar un cierto nivel de desgarro sobre la superficie de rotura y emblanquecimiento, los cuales son mecanismos de deformación plástica típicos de los materiales termoplásticos dúctiles.

Por otra parte, resulta interesante apreciar claramente que el tamaño de las partículas de residuo supera por mucho al tamaño de las rejillas de los tamices utilizados para seleccionar las dimensiones del residuo (1.68 y 0.59 mm). Lo anterior se atribuye a la incompatibilidad molecular entre los materiales. Durante el proceso de extrusión, el residuo se va aglomerando en lugar de dispersarse dentro de la matriz de PS debido a una cohesión interfacial débil e inmiscibilidad entre el PS y el LDPE²², provocando un notable incremento en el tamaño de las partículas de residuo, quedando incluso como una fase distinta y bien definida en el interior del PS.

Estas partículas o regiones aglomeradas de residuo estarían actuando como concentradores de tensión, lo cual se corrobora al observar que el emblanquecimiento es más intenso en el contorno del residuo aglomerado, promoviendo el fallo prematuro del material.

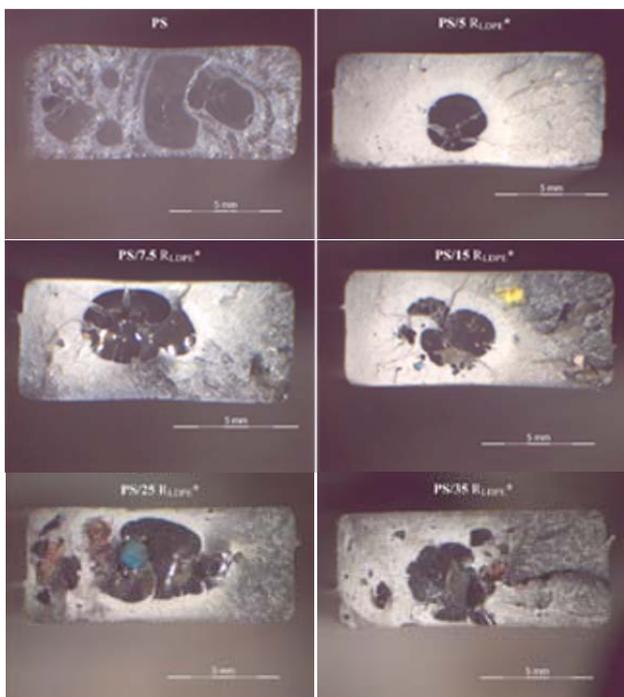


Figura 2. Microfotografías correspondientes a la superficie de fractura del PS y las mezclas PS/R_{LDPE}* sometidas a tracción.

Propiedades mecánicas: Flexión

La **Figura 3** presenta las curvas tensión vs deformación obtenidas durante los ensayos a flexión del PS y las mezclas PS/R_{LDPE}*.

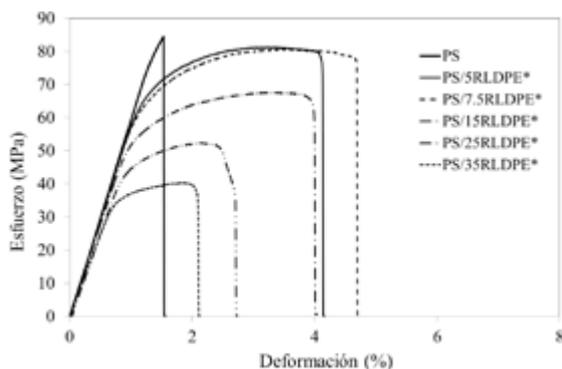


Figura 3: Curvas s vs e del poliestireno y las mezclas PS/ R_{LDPE}* ensayadas a flexión.

Tal como se puede apreciar, la forma de la curva σ vs ϵ del PS es completamente distinta a las mezclas PS/ R_{LDPE}^* . El PS presenta una curva tipo frágil, mientras que las mezclas PS/ R_{LDPE}^* desarrollan curvas con cierto grado de deformación plástica.

Similar a lo observado en los ensayos de tracción, la mezcla PS/ $5R_{LDPE}^*$ es ligeramente menos dúctil que la mezcla PS/ $7.5R_{LDPE}^*$. La **Tabla 2** presenta los parámetros mecánicos E_p , σ_{f_m} y ϵ_{BP} los cuales se calculan a partir de las curvas fuerza vs desplazamiento y las ecuaciones **1**, **2** y **3**. Tanto el módulo como la rigidez del PS disminuyen al aumentar el contenido de residuo, siendo más evidente con porcentajes mayores al 15% en peso.

Por otra parte, la ductilidad de las mezclas PS/ R_{LDPE}^* presenta un comportamiento similar a lo observado en los ensayos a tracción, siendo la mezcla PS/ $7.5 R_{LDPE}^*$ el material que mayor ductilidad desarrolla, disminuyendo notoriamente al incrementar el contenido de residuo.

Tabla 2. Parámetros mecánicos del PS y las mezclas PS/ R_{LDPE}^* y PS/ R_{LDPE}^* -rep obtenidas a través de ensayos a flexión

Material	E (GPa)	σ_{max} (MPa)	ϵ_b (%)
PS	6.0 ± 0.14	85.6 ± 0.53	1.5 ± 0.3
PS/5 R_{LDPE}^*	5.8 ± 0.14	80.9 ± 1.44	3.9 ± 0.20
PS/7.5 R_{LDPE}^*	5.8 ± 0.11	79.1 ± 1.26	4.3 ± 0.23
PS/15 R_{LDPE}^*	5.6 ± 0.08	65.3 ± 1.18	3.9 ± 0.36
PS/25 R_{LDPE}^*	5.3 ± 0.11	51.9 ± 1.75	2.9 ± 0.28
PS/35 R_{LDPE}^*	4.9 ± 0.10	40.5 ± 1.99	2.3 ± 0.36
PS/5 R_{LDPE}^* -rep	5.9 ± 0.08	80.4 ± 2.18	3.68 ± 0.75
PS/7.5 R_{LDPE}^* -rep	5.8 ± 0.11	76.2 ± 0.18	4.16 ± 0.13
PS/15 R_{LDPE}^* -rep	5.6 ± 0.09	64.6 ± 1.49	4.23 ± 0.29
PS/25 R_{LDPE}^* -rep	5.3 ± 0.16	53.1 ± 0.52	3.87 ± 0.26
PS/35 R_{LDPE}^* -rep	4.9 ± 0.18	42.3 ± 1.21	3.27 ± 0.51

La **Figura 4** muestra las superficies de rotura del PS y las mezclas PS/ R_{LDPE}^* correspondientes a las probetas ensayadas bajo la configuración a flexión.

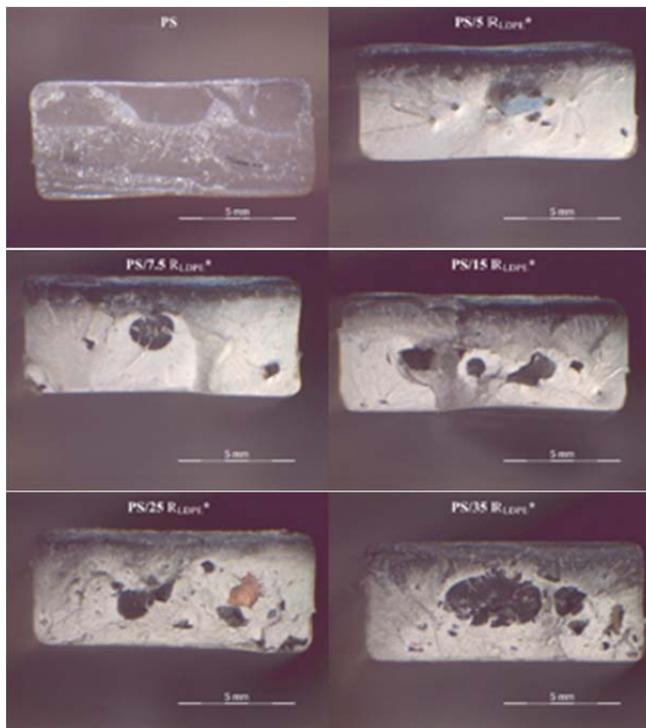


Figura 4. Microfotografías correspondientes a la superficie de fractura del PS y las mezclas PS/ R_{LDPE}^* sometidas a flexión.

El ensayo de flexión produce un esfuerzo de tracción en el lado convexo de la probeta y un esfuerzo de compresión en su lado cóncavo. Lo anterior ocasiona un área de esfuerzo de cizalla a lo largo de la línea media de la sección transversal de la probeta, razón por la cual es posible apreciar dos zonas distintas: una zona oscura, que es la región sometida a compresión; y una superficie blanquecina, que corresponde con la región sometida a tensión durante el ensayo a flexión.

Similar a lo observado en las superficies de rotura correspondientes a las probetas sometidas a tracción, las superficies de rotura de las probetas a flexión permiten observar la aglomeración de partículas de residuo, siendo más evidente cuando el contenido de residuo aumenta. Además, es posible apreciar cierto nivel de desgarro plástico, lo cual es detectado durante el ensayo a flexión como la elongación del material.

Debido a la aglomeración del R_{LDPE}^* dentro del poliestireno, es necesario reprocesar el material a través de un segundo proceso de extrusión monohusillo, en un intento por mejorar el mezclado de ambos materiales. A pesar de que el proceso de extrusión mono-husillo no tiene la capacidad de lograr un mezclado adecuado, como sí se consigue a través del proceso de extrusión doble-husillo, el uso de este tipo de extrusores evita una degradación excesiva de los materiales durante su reprocesado.

El reprocesado se llevó a cabo utilizando los extruidos obtenidos inicialmente (PS/R_{LDPE}^*) bajo las mismas condiciones de extrusión descritas en este trabajo. Posteriormente, las mezclas reprocesadas (denominadas como PS/R_{LDPE}^*-rep) se secaron e inyectaron para obtener las probetas normalizadas, con las cuales se realizaron los ensayos mecánicos bajo la configuración de flexión.

La **Figura 5** muestra las curvas σ vs ϵ y bajo la configuración a flexión del PS y las mezclas PS/R_{LDPE}^*-rep . Es posible apreciar que las mezclas reprocesadas presentan un comportamiento similar al estudiado anteriormente (**figura 3**), con una resistencia más baja, pero con mayor ductilidad que el poliestireno.

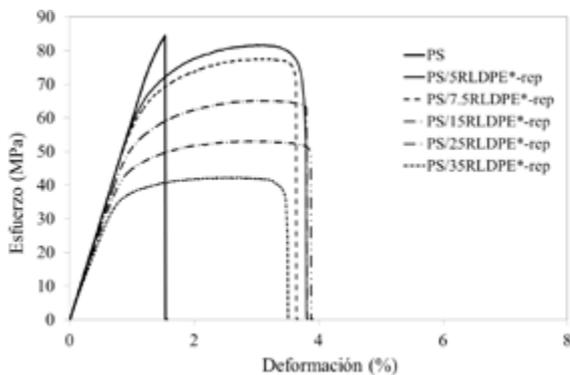


Figura 5: Curvas σ vs ϵ del poliestireno y las mezclas PS/R_{LDPE}^*-rep ensayadas a flexión.

Al comparar los parámetros mecánicos de las mezclas PS/R_{LDPE}^*-rep respecto a los parámetros de las mezclas PS/R_{LDPE}^* (**Tabla 2**), es posible encontrar que no hay una variación relevante entre los parámetros de rigidez y resistencia, ya que ambos parámetros disminuyen al incrementar el contenido de residuo. Sin embargo, las principales variaciones se encuentran en la deformación a rotura. En el caso de las mezclas reprocesadas, la ductilidad es más uniforme, ya que la variación entre las mezclas $PS/5_{LDPE}^*-rep$ y $PS/35_{LDPE}^*-rep$ no sobrepasa el 10%; mientras que en las mezclas PS/R_{LDPE}^* esta variación es cercana al 41%. Además, las mezclas reprocesadas no presentan una tendencia clara respecto al contenido de residuo.

A partir de las observaciones realizadas sobre las superficies de rotura de las probetas PS/R_{LDPE}^*-rep (**Figura 6**), es posible apreciar que las aglomeraciones de residuo resultan ser menos evidentes, lo cual indica que su dispersión es mucho mayor cuando las mezclas PS/R_{LDPE}^* son procesadas dos veces por extrusión monohusillo.

Un cambio interesante se observa a partir de un contenido de residuo del 25% ($PS/25_{LDPE}^*-rep$), donde las superficies de rotura presentan un emblanqueamiento total, abarcando toda la sección transversal de la probeta, lo cual confirmaría que las partículas de LDPE están dispersas dentro de la matriz de PS y que actúan durante todo el ensayo, otorgándole a los materiales de una mayor ductilidad sin afectar su resistencia.

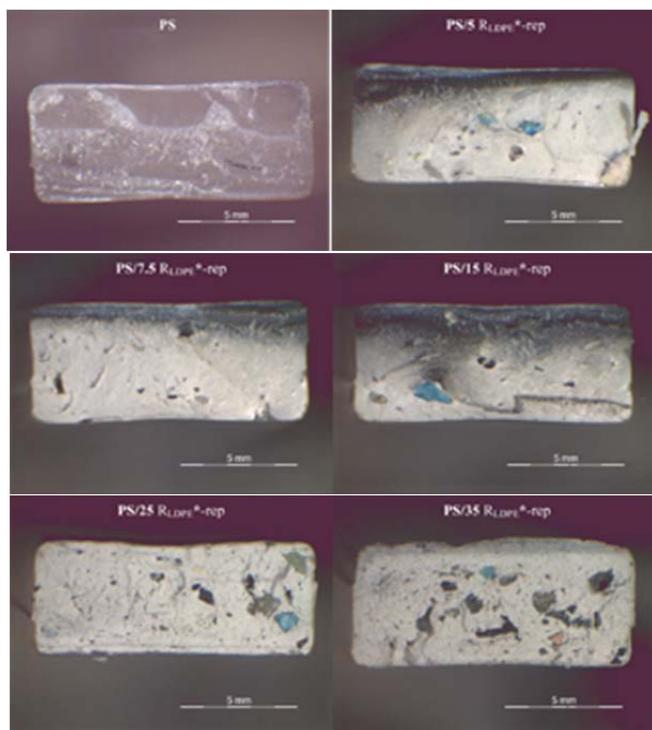


Figura 6. Microfotografías correspondientes a la superficie de fractura del PS y las mezclas PS/ R_{LDPE}^* -rep sometidas a flexión.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al MICINN de España por la financiación del Proyecto MAT201340730-P. Franco Urquiza agradece a CONACyT por el apoyo otorgado a través del programa Cátedras CONACyT.

CONCLUSIONES

En este trabajo se prepararon mezclas de PS con residuo tamizado de LDPE proveniente de cables eléctricos. Las mezclas se prepararon utilizando una línea de extrusión mono-husillo variando únicamente el contenido de residuo en peso. Las mezclas fueron ensayadas a tracción y a flexión para su evaluación mecánica.

En ambas configuraciones de ensayo se observó una disminución de la rigidez y la resistencia del PS al añadir el residuo R_{LDPE}^* . La ductilidad del PS se vio favorecida por la presencia del residuo. Este comportamiento se adjudicó a la naturaleza intrínseca de ambos materiales.

Las observaciones realizadas sobre la superficie de rotura de las mezclas permitieron apreciar la aglomeración del residuo dentro del PS, observándose dos fases distintas y muy bien definidas. La aglomeración se adjudicó a la falta de miscibilidad entre ambos materiales, debido a su incompatibilidad molecular. Un segundo paso por extrusión mono-husillo permitió mejorar la dispersión del residuo dentro del PS. La evaluación mecánica de las mezclas reprocesadas, bajo la configuración a flexión, no reportó cambios drásticos en la rigidez y la resistencia respecto a las propiedades mecánicas de las mezclas procesadas una vez por extrusión mono-husillo, por lo que el reprocesado no degrada a los materiales reprocesados de forma excesiva. La mejora en la dispersión del residuo permitió incluso mejorar la ductilidad de las mezclas respecto a las procesadas una vez por extrusión, lo que debería permitir adaptar el mezclado de ambos materiales, hasta un cierto nivel de procesado industrial, sin la necesidad de utilizar agentes compatibilizantes.

REFERENCES

1. U.S. Energy Information Administration, "No Title," *Annual Energy Outlook*, 2016. [Online]. Available: [http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383\(2016\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383(2016).pdf).
2. A. of plastic Manufacturers, "Plastics-The facts," Brussels, 2015.
3. Achilias, D.S.; Roupakias, C.; Megalokononimos, P.; Lappas, A. Recycling techniques of polyolefins from plastic wastes, *Glob. NEST J.* **2008**, *10*, 114–122.
4. Achilias, D.S.; Roupakias, C.; Megalokononimos, P.; Lappas, A.; Antonakou, V. Chemical recycling of plastic wastes made from polyethylene (LDPE and HDPE) and polypropylene (PP), *J. Hazard. Mater.* **2007**, *149*, 536–542.
5. Carta, D.; Cao, G.; D'Angeli, C. Chemical recycling of poly(ethylene terephthalate) (pet) by hydrolysis and

- glycolysis, *Environ. Sci. Pollut. Res.* **2003**, *10*, 390–394.
6. Zhao, C.S.; Huang, F.L.; Xiong, W.C.; Wang, Y.Z. A novel halogen-free flame retardant for glass- fiber-reinforced poly(ethylene terephthalate), *Polymer Degrad. Stab.* **2008**, *93*, 1188–1193.
 7. Hopewell, J.; Dvorak, R.; Kosior, E. Plastics re- cycling: challenges and opportunities, *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.* **2009**, *364*, 2115–2126.
 8. Grause, G.; Ishibashi, J.; Kameda, T.; Bhaskar, T.; Yoshioka, T. Kinetic studies of the decomposition of flame retardant containing high-impact poly- styrene, *Polym. Degrad. Stab.* **2010**, *95*, 1129–1137.
 9. Wang, R.; Xu, Z. Recycling of non-metallic fractions from waste electrical and electronic equip- ment (WEEE): a review. *Waste Manag.* **2014**, *34*, 1455–1469.
 10. Mahanta, D.; Dayanidhi, S.A.; Mohanty, S.; Na- yak, K. Mechanical, thermal, and morphological properties of recycled polycarbonate/recycled poly(acrylonitrile-butadiene-styrene) blend nano- composites, *Polym. Compos.* **2012**, *33*, 2114–2124.
 11. Elmaghor, F.; Zhang, L.; Fan, R.; Li, H. Recycling of polycarbonate by blending with maleic anhy- dride grafted ABS, *Polymer (Guildf)*. **2004**, *45*, 6719–6724.
 12. Vazquez, Y.V.; Barbosa, S.E. Recycling of mixed plastic waste from electrical and electronic equipment. Added value by compatibilization, *Waste Manag.* **2016**, *53*, 196–203.
 13. Park, M.-H. Recovery of the mechanical properties of recycled styrene-ethylene-butylene-styrene/polypropylene (SEBS/PP) composites, *Toxi- col. Environ. Health Sci.* **2015**, *7*, 277–281.
 14. Navarro, R.; Ferrándiz, S.; López, J.; Seguí, V.J. The influence of polyethylene in the mechanical recycling of polyethylene terephthalate, *J. Mater. Process. Technol.* **2008**, *195*, 110–116.
 15. Jin, H.; Gonzalez-Gutierrez, J.; Oblak, P.; Zupančič, B.; Emri, I. The effect of extensive me- chanical recycling on the properties of low den- sity polyethylene. *Polym. Degrad. Stab.* **2012**, *97*, 2262–2272.
 16. Guschl, P.C.; Otaigbe, J.U. Crystallization kinetics of low-density polyethylene and polypropylene melt-blended with a low-Tg tin-based phosphate glass, *J. Appl. Polym. Sci.* **2003**, *90*, 3445–3456.
 17. Ávila, A.F.; Duarte, M.V. A mechanical analysis on recycled PET/HDPE composites, *Polym. Degrad. Stab.* **2003**, *80*, 373–382.
 18. Kazemi, Y.; Ramezani Kakroodi, Y.A.; Rodriguez, D. Compatibilization efficiency in post-consu- merrecycled polyethylene/polypropylene blends: Effect of contamination. *Polym. Eng. Sci.* **2015**, *55*, 2368–2376.
 19. Franco-Urquiza, E.A.; Camacho, N.; Maspoch, M.L. Tensile properties of LDPE/electrical cable waste blends prepared by melt extrusion process, *AFINIDAD.* **2017**, *74*, 147-153.
 20. Franco-Urquiza, E.; Maspoch, M.L. Feasibility of reusing waste PVC from electric cables: mechanical properties, *AFINIDAD*, **2014**, *71*, 185–191.
 21. Arroyo Ramos, M.; Collar, E.P. Morphology and Mechanical Properties Relationship of PS/LDPE Blends, *J. Polym. Eng.* **1987**, *7*, 137.
 22. Taha, M.; Frerejean, V. Morphology development of LDPE-PS blend compatibilization, *J. Appl. Polym. Sci.* **1996**, *61*, 969–979.