

Reciclado de PEBD reforzado con partículas de hierro como propuesta sustentable para la economía circular

Recycling of LDPE reinforced with iron particles as a sustainable proposal for the circular economy

Aguilar-Ayala, R.¹; Sánchez-Pozos, M. ¹

Recibido: 13 de octubre de 2022 – Aceptado: 26 de febrero de 2023

RESUMEN

El procesamiento del polietileno de baja densidad reciclado (PEBDR) empleando extrusión resultó ser una alternativa muy útil para procesar el plástico de desecho. El PEBDR reforzado con Fe, presentó mejoras significativas en las propiedades mecánicas de deformación a la tensión, e impacto Charpy. El polietileno de baja densidad virgen (PEBD) reforzado con Fe, presentó

valores más elevados de resistencia a la tensión y dureza en función de la cantidad de Fe incorporado. Sin embargo, el PEBDR reforzado con Fe, presentó propiedades interesantes, ya que se mejoran significativamente las propiedades mecánicas con respecto a las propiedades del material virgen. Se elaboraron materiales compuestos a base de PEBD y PEBDR ambos reforzados con partículas de Fe en porcentajes de 0, 5, 10, 15, 20 y 25 % p/p

¹ Universidad Autónoma del Estado de México¹Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca.
Autores de correspondencia:
daa_onte@hotmail.com, msanchezpo@uaemex.mx



empleando un extrusor monohusillo. Estos materiales pueden ser una opción sustentable, para ser usados como materiales estructurales, debido a las propiedades mecánicas que presentaron. Lo cual permitiría reintegrar los desechos de PEBD en la cadena productiva, dándoles un nuevo valor agregado y por tanto, una pequeña aportación a la economía circular de los plásticos.

PALABRAS CLAVE: Reciclado, compuestos, PEBD

ABSTRACT

The processing of recycled low-density polyethylene (LDPER) using extrusion turned out to be a very useful alternative for processing waste plastic. The Fe-reinforced LDPER presented significant improvements in the mechanical properties of tensile deformation and Charpy impact. Virgin low-density polyethylene (LDPER) reinforced with Fe presented higher values of tensile strength and hardness depending on the amount of Fe incorporated. However, the mechanical properties of the LDPER reinforced with Fe, were significantly presented improved when compared to the

properties of the virgin material. Composite materials based on LDPE and LDPER, both reinforced with Fe particles in percentages of 0, 5, 10, 15, 20 and 25% w/w, were produced using a single-screw extruder. These materials can be a sustainable option to be used as structural materials due to the mechanical benefits they present. This would allow LDPE waste to be reintegrated into the production chain, giving it new added value and therefore a small contribution to the circular economy of plastics.

KEYWORDS: recycled, composites, LDPE

NOMENCLATURA:

PEBD - Polietileno de baja densidad

PEBDR - Polietileno de baja densidad reciclado

PEBD-Fe - Compuesto a base de PEBD y limadura de hierro

PEBDR-Fe - Compuestos a base de PEBDR y limadura de hierro

RSU - Residuos Sólidos Urbanos

CNA - Consumo Nacional Aparente

INTRODUCCIÓN

La problemática actual ocasionada por el inadecuado uso de los plásticos, nos ha llevado a modificar la concepción de residuos, ya que éstos no continuarán siendo tratados como basura. Ahora son recursos fuera de lugar, lo cual es importante replantear y revalorizar en función del tiempo, con el objetivo de que sigan conservando su valor económico, lo cual llevará a minimizar la generación de residuos para lograr una economía sostenible.

Para migrar hacia la economía circular es necesario diseñar los productos, seleccionando los materiales con menor impacto. Para ello es requisito conocer su ciclo de vida, desde cómo se obtienen, de dónde vienen, cuántas emisiones genera su obtención, etc.; así como la manera en que esto puede afectar la salud humana, los ecosistemas y los recursos naturales. El empleo de materiales reciclados resulta ser una opción completamente viable ya que de acuerdo a las técnicas de análisis de ciclo de vida, el incorporar materiales reciclados, tiene una carga ambiental nula. Los materiales reciclados permiten la optimización al final de la vida útil de un producto, al ser reutilizados, remanufacturados, reciclados etc. para reintegrarlos al ciclo de vida.

Por lo anterior, en este trabajo se plantea, como una opción sustentable, el diseño de un material polimérico compuesto con polietileno de baja densidad reciclado y reforzado con partículas metálicas de hierro (también de desecho de una empresa metal-mecánica) para generar un material con propiedades mecánicas mejoradas, y apto para ser empleado en aplicaciones estructurales con un valor agregado importante por ser elaborado únicamente con materiales de desecho.

Los derivados del petróleo son fuente de materia prima para la fabricación de materiales plásticos, como las poliolefinas, así como otros. Entre las poliolefinas, destacan el polietileno de baja densidad (PEBD), el cual es un plástico que se utiliza para fabricar diversos productos de uso diario, como son los envases y los embalajes para alimentos, entre muchos otros artículos. Las propiedades de este plástico, precio y facilidad de procesamiento han hecho que el PEBD sea ampliamente utilizado y por ello forme parte de desechos sólidos de muchas ciudades.

Desde 1950 hasta 2017 la producción mundial anual de plástico aumentó 200 veces, alcanzando una cantidad de alrededor de 359-381 millones de toneladas y se espera que supere los 1800 millones de toneladas para 2050 (Bouche, 2019) y (Stanton, 2021).

La cifra más reciente con datos del 2015 revela que en México, la generación de residuos sólidos urbanos (RSU) superó las 53,1 millones de toneladas, lo cual representó un incremento del 61.2 % con respecto al año (SEMARNAT, 2015).

Los plásticos representan el 10.9 % del total de los RSU, lo que implica que 4,589.2 toneladas fueron de materiales plásticos. Hay 6 importantes clases de plásticos que son los más utilizados para empaques y envases, que son usados en el mercado en función de su facilidad de reciclaje (ver Tabla 1). Del número total de resinas que se utilizaron en la industria de los plásticos en el año 2015, el 47 % se destinó a envases y embalajes. Del total de la resina empleada, solo se recolectó el 18 % para el tratamiento post-consumo y reciclaje. También se observa que, entre los plásticos con mayor porcentaje de recolección a nivel nacional, están el PEAD con 22 % y el polietileno lineal de baja densidad (LLDPE) con 35 %. No obstante, al considerar sólo envases y embalajes, los plásticos con mayor acopio son; el LLDPE con 80 %, el PEAD con 50 % y el PVC con 50 %. SEMARNAT (2015).

TABLA 1.
PRINCIPALES PLÁSTICOS EN EL MERCADO (NatGeo , 2018)

Número de identificación para reciclado	Tipo de plástico	Acrónimo
1	Polietileno tereftalato	PET
2	Polietileno de alta densidad	PEAD
3	Policloruro de vinilo	PVC
4	Polietileno de baja densidad	PEBD
5	Polipropileno	PP
6	Poliestireno	PS

La Tabla 2 muestra el concentrado de la cantidad de plástico (en porcentaje), recolectado para reciclarse con respecto al Consumo Nacional Aparente (CNA), con respecto al porcentaje de plástico recolectado de uso para envases y embalajes.

La información que se tiene para el PEBD es que, la recolección es cercana de al 6 %. En general, los niveles de reciclaje en México son mínimos, aunque a nivel global el reciclaje del PET en nuestro país ocupa un lugar importante, el PEBD tiene un valor bajo de 2.78% del total de resina utilizada en México, lo cual equivale a 558 000 toneladas de PEBD que no son recolectadas ni recicladas por año. (ECOCE,2019).

El polietileno se utiliza ampliamente en numerosas aplicaciones, debido a sus buenas propiedades físicas, tales como; alta resistencia química, no tóxico, inodoro, dieléctrico, impermeable, y ligero. Desde 1945 su uso se ha incrementado notablemente. Sin embargo, el PEBD, es un material que en general se recupera en muy bajo porcentaje como se puede apreciar en la Tabla 2. Por lo que requiere mayor investigación, el PEBD es un material polimérico muy noble, ya que dentro de la gama de los polímeros “comodities” es uno de los polímeros más usados

TABLA 2.

VALORES DE LA RECOLECCIÓN POST-CONSUMO DE LOS PLÁSTICOS MÁS UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA MEXICANA. ADAPTADO DE:

Plan Nacional Privado Colectivo de Manejo de residuos de Envase Post-Consumo de PET, PEAD, y otros. (ECOCE, 2019)

CNA de diversos polímeros (miles de toneladas)	PEAD	PVC	PEBD	LLDPE	PP	PS	Total	%
CNA de resina promedio	820	512	574	412	1 138	487	4 742	100
CNA de envases y embalajes	363	4	254	183	504	216	2 233	47
Residuo plástico acopiado	182	2	16	146	61	2	837	18
% de residuo plástico acopiado Respecto a CNA promedio	22 %	0.4 %	3 %	35 %	5 %	0.4 %	18 %	
% de residuo plástico acopiado respecto a CNA de envases y embalajes	50 %	50 %	6 %	80 %	12 %	1 %	---	

y que además se puede reciclar mecánicamente sin degradación térmica significativa y con bajos costos energéticos, como lo ha reportado Gu et al. (2017).

El reciclaje mecánico de residuos plásticos es una de las técnicas más empleadas como estrategia para la disminuir el impacto ambiental de estos materiales. Gu, et al (2017) reportó el análisis de ciclo de vida, usando el proceso de extrusión de polímeros reciclados. Este autor señala que es posible disminuir la huella de carbono, si en lugar de usar resina virgen, se emplean plásticos reciclados combinados con materiales de refuerzos y aditivos. Por lo tanto, el reciclaje mecánico resultó ser una alternativa superior en la mayoría de los aspectos ambientales y mostró ser una de las opciones más sustentable en comparación con otras técnicas utilizadas para el reciclado, como lo reporta Tišler-Korljan (2014) en términos de: recuperación de energía (incineración), reciclaje de materias primas (pirólisis, hidrogenación, gasificación) y química (despolimerización).

En general, los plásticos reciclados se pueden considerar como una fuente de material renovable y utilizarlos en la fabricación de diversos productos, podría reducir en gran medida los gases de efecto invernadero, así como las emisiones y la huella de carbón. Los plásticos reciclados representan un ahorro de 20 a 50% en términos de precios de mercado en comparación con sus homólogos vírgenes.

Los materiales compuestos a base de polímeros reforzados pueden ser considerados materiales de ingeniería debido a sus elevadas propiedades mecánicas y estabilidad térmica, con propiedades estructurales importantes y sumamente adaptables y flexibles a extensas aplicaciones en la industria aeroespacial, automotriz, aeronáutica y en la construcción. Sheikh et al. (2009) y Zuccheratt (2017) reportaron el uso de PET reforzado con hierro para generar un incremento en las propiedades mecánicas. De igual manera, Singh (2016) desarrolló un trabajo, en el que comparaba las propiedades mecánicas del PEBD y el polietileno de alta densidad (PEAD) con concentraciones menores al 12 % de Fe (hierro), obteniendo un comportamiento similar en las propiedades mecánicas de los dos materiales al ser sometidos a diferentes condiciones de esfuerzo. Se reportó un aumento en la resistencia mecánica de ambos compuestos ya que las propiedades mecánicas resultaron ser bastante mayores que las obtenidas en la matriz original (material virgen).

En el presente trabajo se han procesado compuestos de PEBD y PEBDR empleando partículas de Fe a los porcentajes de 0, 5, 10, 15, 20 y 25 % p/p. Los compuestos elaborados fueron caracterizados mecánicamente para determinar su dureza, resistencia a la tensión e impacto. El análisis de estas propiedades permitió establecer el grado de desempeño que los compuestos de PEBDR-Fe presentan en comparación con las formulaciones de PEBD-Fe. Se considera que esta información es importante en términos de sustentabilidad, ya que permite determinar la factibilidad de incluir a un compuesto PEBDR-Fe como un material con propiedades mecánicas estructurales a la economía circular de los materiales poliméricos.

METODOLOGÍA

Se utilizaron dos tipos de resinas; polietileno de baja densidad (PEBD) virgen (PX20020P) producido por Petróleos Mexicanos (PEMEX) y polietileno de baja densidad post-consumo industrial (PEBDR), el cual fue proporcionado por una empresa fabricante de bolsa de polietileno (en forma de pellets). El PEBD reciclado contiene carbonato de calcio 5 % y pigmento 8 %. Ambas resinas fueron utilizadas como matrices en la elaboración de materiales poliméricos compuestos, reforzados con partículas de hierro (Fe). El hierro utilizado, es limadura de Fe, subproducto de los procesos de mecanizado en el Laboratorio de Ingeniería Mecánica de la UAEMex. La limadura de Fe se calentó en una mufla hasta 280°C por 2 h, para eliminar cualquier residuo orgánico que pudiera contener. Las partículas de Fe, tienen tamaños que van de 5 μm hasta 25 μm .

Preparación y caracterización de los compuestos

Los compuestos PEBD- Fe y PEBDR-Fe se mezclaron en cinco diferentes proporciones de Fe en 0, 5, 10, 15, 20 y 25 (% p/p) (ver Tablas 3 y 4) para cada formulación. Para elaborar los materiales compuestos, se incorporaron la matriz polimérica y las partículas de Fe en los diferentes porcentajes en un extrusor monohusillo marca Brabender modelo 100 (L/D:10) empleando un perfil de temperaturas de 100, 110, 120 y 130 °C y una velocidad de mezclado de 48 rpm. Para el procesamiento de los compuestos con PEBDR-Fe, se modificó el perfil de temperaturas a 120, 130, 140, 150 °C y se utilizó la misma velocidad de mezclado (48 rpm).

TABLA 3.
COMPOSICIÓN DE LOS COMPUESTOS PEBD-Fe (% p/p)

PEBD (% p/p)	Fe (%)	Identificación
100	0	LDPE0
95	5	LDPE5
90	10	LDPE10
85	15	LDPE15
80	20	LDPE20
75	25	LDPE25

TABLA 4.
COMPOSICIÓN DE LOS COMPUESTOS PEBDR-Fe (% p/p)

PEBDR (% p/p)	Fe(%)	Identificación
100	0	LDPER0
95	5	LDPER5
90	10	LDPER10
85	15	LDPER15
80	20	LDPER20
75	25	LDPER25

Para los ensayos mecánicos de las formulaciones elaboradas, se moldearon probetas para ensayos de tensión e impacto por termo-compresión utilizando una prensa CARVER modelo Auto “C”, a la temperatura de 110°C durante 5 min para las probetas de PEBD y a 140 °C durante 5 min para las probetas de PEBDR. El ensayo de tensión se realizó empleando la norma ASTM D 638-14 en una máquina INSTRON (modelo 3360 series), con una celda de carga de 5 kN. Para cada formulación se ensayaron cinco probetas, a una velocidad de deformación de 3 mm/min y se obtuvieron las gráficas esfuerzo-deformación de cada probeta. Los parámetros mecánicos medidos fueron; esfuerzo máximo a tensión, elongación a la ruptura y el módulo de elasticidad. El ensayo de impacto se realizó empleando la norma ASTM D 6110 en una máquina TORSEE de 30 kgf-m, se ensayaron cinco probetas de cada formulación. Se registró la energía absorbida y la resistencia

al impacto. Para la prueba de dureza se empleó un durómetro Mitutoyo Shore D modelo LD055. Las pruebas de dureza se realizaron en tres regiones diferentes para cada probeta y se obtuvo el valor promedio. Todos los ensayos se realizaron a temperatura ambiente.

RESULTADOS

Prueba de tensión

El esfuerzo a la tensión del PEBD virgen con 0% de Fe es de 10.6 MPa, mientras que para el PEBDR con 0% Fe es de 6.3 MPa, dicha tendencia se conserva aún con la incorporación de Fe. Sin embargo, el esfuerzo a la tensión se incrementa en ambos polímeros proporcionalmente con el incremento de la cantidad de Fe (Figuras 1 y 2).

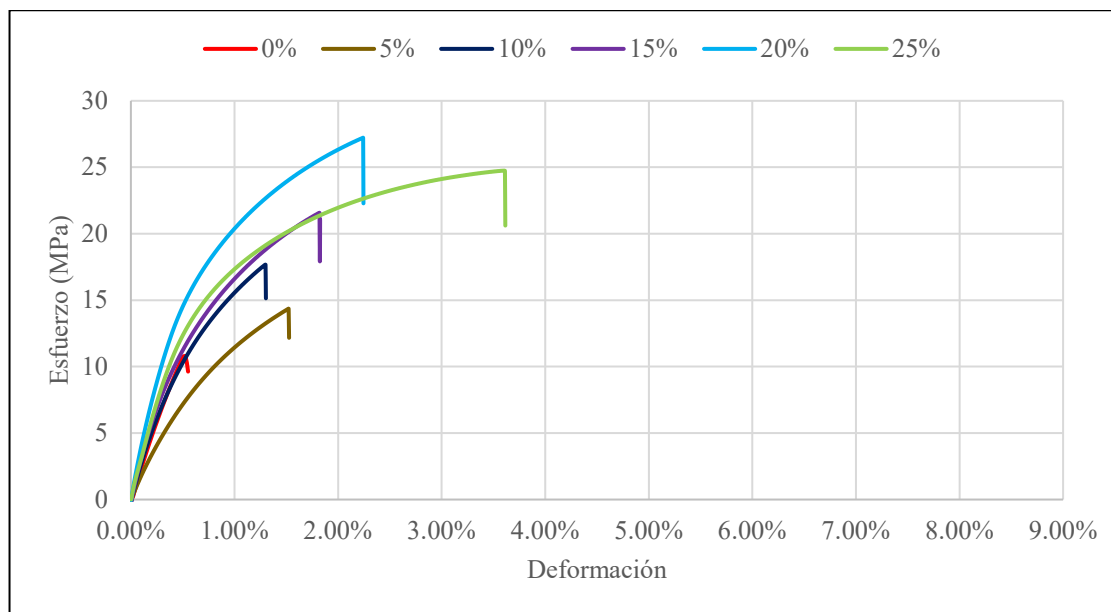
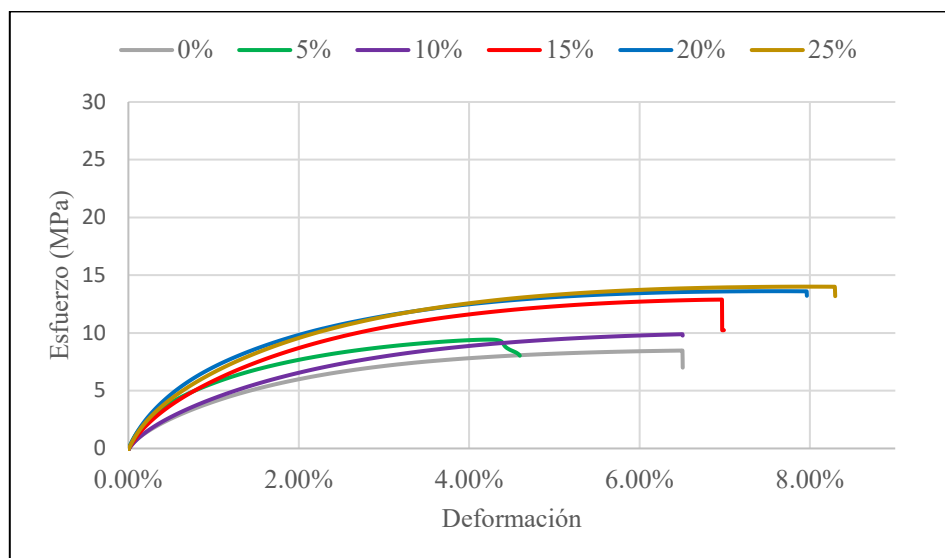


FIGURA 1.
PRUEBA DE TENSION DEL PEBD-Fe. (Aguilar R.,2019).

**FIGURA 2.***PRUEBA DE TENSIÓN DEL PEBDR-Fe. (Aguilar R.,2019).*

De las gráficas esfuerzo deformación de las Figuras 1 y 2, se obtienen las siguientes propiedades mecánicas (Tablas 5 y 6):

TABLA 5.*PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA PRUEBA DE TENSIÓN DEL PEBD REFORZADO CON FE. (Aguilar R.,2019)*

% Fe	Esfuerzo de tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)	Carga a la rotura (MPa)	Esfuerzo último a la tensión (MPa)	Deformación promedio (%)
0	10,6	1237,5	795,8	11,3	1,1
5	13,1	1686,9	803,25	14,6	1,3
10	16,9	1823,3	808	17,7	1,3
15	16,5	2027	812,1	22,2	1,8
20	16,5	2403	810	27	2,2
25	15,1	2185	813,6	25	3,6

TABLA 6.*PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA PRUEBA DE TENSIÓN DEL PEBD REFORZADO CON FE. (Aguilar R.,2019)*

% Fe	Esfuerzo de tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)	Carga a la rotura (MPa)	Esfuerzo último a la tensión (MPa)	Deformación promedio (%)
0	6,3	401,2	112,5	8,9	6,4
5	7,09	462,8	136,9	9,8	4,5
10	7,4	533,8	163,2	10	6,5
15	10,3	554,8	185,6	13	7,2
20	9,6	699	193,7	13,8	7,8
25	8,7	796	264,3	14	8,2

La capacidad de deformación del PEBDR resultó ser muy superior a la del PEBD aproximadamente en un 250%. Mientras que el PEBD virgen presenta una mayor resistencia a la deformación, con un valor superior de esfuerzo a la tensión, el PEBDR resultó ser más flexible y presenta una mayor capacidad de deformación. Por lo anterior, el PEBD genera un compuesto con valores del módulo de elasticidad superiores y por tanto propiedades mecánicas de resistencia a la tensión mejoradas. El PEBDR por ser un material reprocesado, es más maleable con gran capacidad de deformación y el consiguiente costo de disminución del módulo de elasticidad.

Prueba de impacto

Como se observa en la Figura 3, los compuestos elaborados con la resina de PEBDR absorben entre el 60 y 70% de la cantidad de energía de impacto, en comparación con los compuestos elaborados con PEBD virgen. Al incrementarse el contenido de Fe, la energía absorbida también aumenta en comparación a los materiales en su estado virgen. El PEBDR es el material que presentó la mayor cantidad de energía absorbida en el ensayo de impacto ya que va desde 0.28 J para un contenido de 0% Fe a 6.46 J para 25% Fe. Esto se debe a que la incorporación de las partículas metálicas aumenta la masa de las probetas, así como su resistencia al impacto y su capacidad de absorber una mayor energía. Sin embargo, el efecto de la carga adicional que contiene el PEBDR, así como pigmentos y aditivos ocasiona que el PEBDR presente una mayor resistencia al impacto.

De igual manera los compuestos PEBDR-Fe presentaron valores mayores de resistencia al impacto en aproximadamente 200% en comparación con la resistencia al impacto presentada por los compuestos PEBD- Fe (ver Figura 4). La resistencia al impacto para el PEBD con 0% Fe es de 2.73 kJ/m² y para el PEBD con 25% Fe es de 62.58 kJ/m², lo cual permite visualizar la gran influencia del Fe en la mejora de la resistencia al impacto. De igual manera para el PEBDR con 0% Fe la resistencia al impacto es de 2.90 kJ/m² y para el PEBDR con 25% de Fe es de 183.09 kJ/m², esta diferencia significativa resulta ser muy importante para las posibles aplicaciones estructurales de este material compuesto. Por tanto, la carga adicional, los pigmentos y los aditivos que contiene el PEBDR tienen un efecto determinante en la mejora de la resistencia al impacto de dichos compuestos.

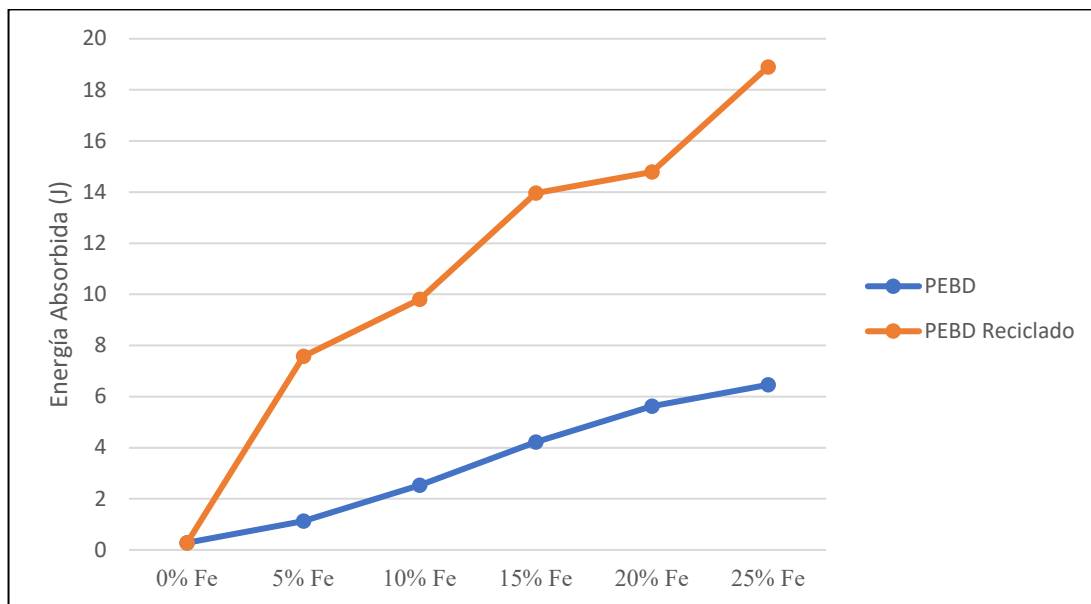


FIGURA 3.
ENERGÍA ABSORBIDA DE PEBD y PEBDR REFORZADOS CON FE (Aguilar R.,2019).

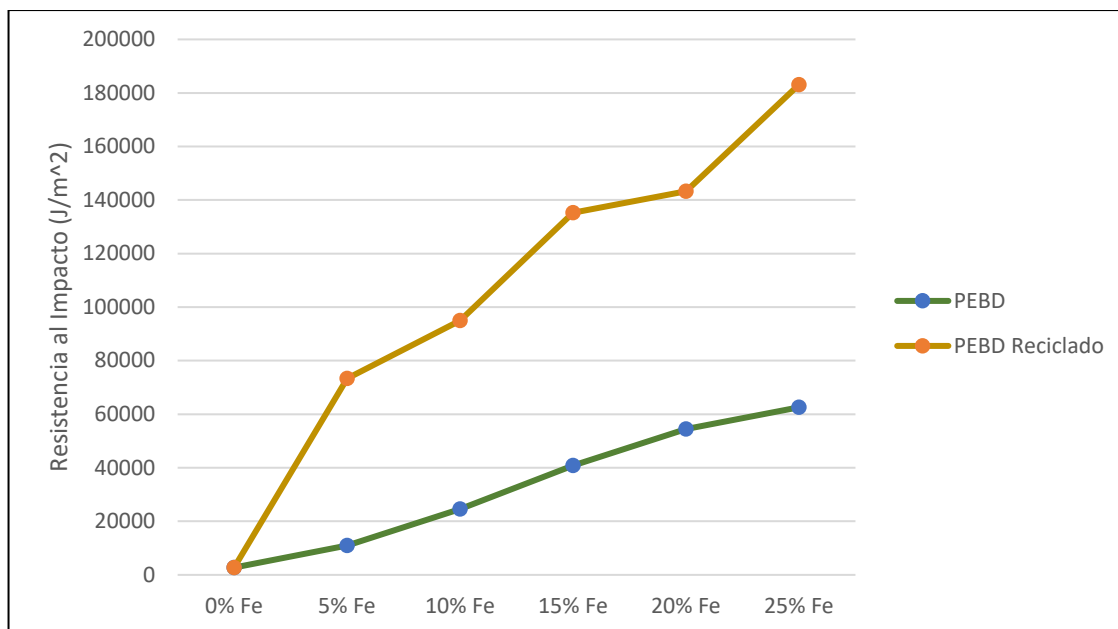


FIGURA 4.
RESISTENCIA AL IMPACTO DE PEBD y PEBDR REFORZADOS CON FE. (Aguilar R.,2019).

Prueba de dureza

Comparando la dureza del PEBD contra la del PEBDR ambos con 0% Fe, se puede apreciar que el PEBD mostró una mayor dureza con respecto al del PEBDR por casi 11 puntos Shore D. En la Figura 5 se observa, que, para cada formulación, el incremento de la dureza depende del contenido de Fe, a mayor contenido de Fe, mayor dureza. Tal es el caso de la formulación con 25 % p/p Fe, donde el valor máximo de dureza fue de 65.8 puntos para la concentración máxima de Fe. En contraste, la formulación PEBDR con 25 % p/p Fe posee 57.2 puntos y corresponden al valor máximo de dureza para los compuestos elaborados con la matriz de PEBDR.

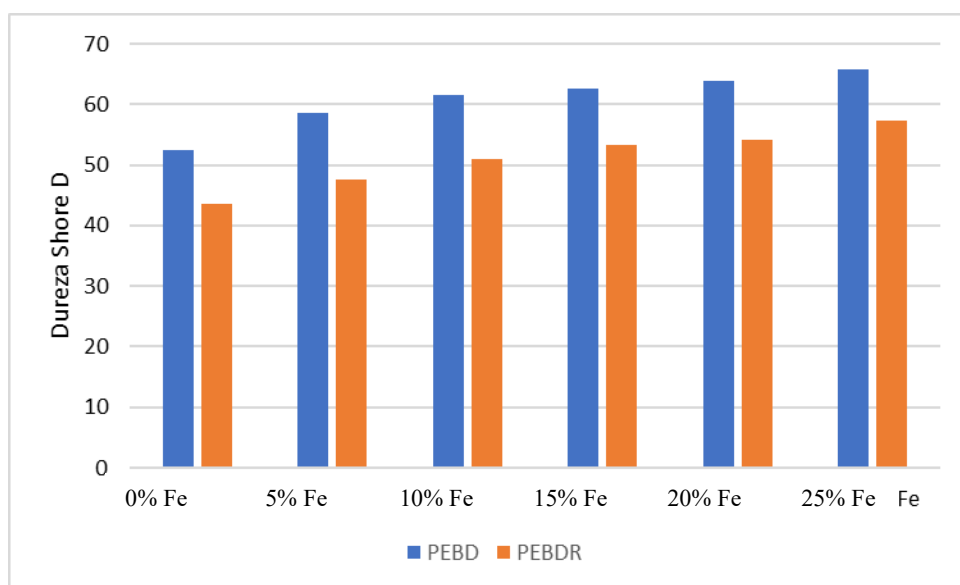


FIGURA 5.

COMPARATIVO DE DUREZAS ENTRE LOS COMPUESTOS PEBD y PEBDR. (Aguilar R., 2019).

Se observa una relación directa de la dureza en función del contenido de Fe, el aumento de dureza que presentan tanto el PEBD y el PEBDR es prácticamente en la misma proporción para cada tipo de plástico, aunque a diferente escala. Se observa un incremento general de la dureza de 1.4 puntos Shore para la familia PEBD-Fe, y un incremento general promedio de 13.7 puntos Shore para los compuestos PEBDR-Fe.

CONCLUSIONES

En términos generales, el procesamiento de la resina de PEBDR resultó ser más difícil de manipular en comparación con el PEBD, debido a las cargas, pigmentos y aditivos añadidos durante su manufactura; así como a los procesos previos a los que fue sometido este plástico en su

primer procesamiento. Las temperaturas de procesamiento del PEBDR son superiores, así como la temperatura de moldeado por termo-compresión. La incorporación de Fe durante el proceso de extrusión, fue un factor importante en la transferencia de energía térmica al PEBD y al PEBDR.

Los materiales a base de PEBDR reforzado con Fe, presentaron propiedades mecánicas con potenciales aplicaciones estructurales, en función de los valores de módulo de elasticidad, dureza y resistencia al impacto obtenidos en la caracterización mecánica. Lo cual podría generar un impacto ecológico positivo, ya que utilizar y mejorar las propiedades del material reciclado y prolongar su periodo de vida útil permitirá la incorporación del PEBDR a la economía circular de los materiales poliméricos.

AGRADECIMIENTOS

A la Unidad Académica de Santiago Tianguistenco- Ingeniería de plásticos- por habernos facilitado la maquinaria y equipo para la realización de la caracterización mecánica de los materiales compuestos presentados en este proyecto.

REFERENCIAS

- Aguilar R. (2019). Caracterización mecánica de materiales compuestos de matriz polimérica PEBD reforzados con partículas de limadura de hierro. Tesis de Ingeniería Mecánica. Universidad Autónoma del Estado de México. México. <http://hdl.handle.net/20.500.11799/105492>
- ASTM D 638-14. (2014). Standar Test Method for Tensile Properties os Plastics. *American Socieety For Testing and Materials*.
- ASTM D 6110-18. (2018). Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastic. *American Society of Testing and Materials*.
- Bouche J., Billard G. (2019). The Challenges of Measuring Plastic Pollution. *Field Actions. Science Rep* 19, p. 68–75. Disponible en <https://journals.openedition.org/factsreports/5319>.
- ECOCE. (2019). Plan Nacional Privado Colectivo de Manejo de Residuos de Envase Post-Consumo de PET, PEAD, y otros. Pp. 7-10. https://www.ecoce.mx/assets/pdf/plan_nacional/PLAN_NACIONAL_PRIVADO_COLECTIVO_DE_MANEJO_DE_RESIDUIS_DE_ENVASES_Y_EMPAQUES_2019_SEMARNA_T_2.pdf.

- Gu F., Guob J., Zhang W., Summers P. A., Hall P. (2017). From waste plastics to industrial rawmaterials: A life cycle assessment of mechanical plastic recycling practice based on a real-world case study. *Science of the Total Environment*. 601, p.1192–1207, Elsevier. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969717313980?via%3Dihub>
- NatGeo. (2018). *Tipos de plásticos según su facilidad de reciclaje*. Consultado el 12 de diciembre de 2018, de National Geographic Channel Sitio web. Disponible en https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/actualidad/tipos-plastico-segun-su-facilidad-reciclaje_12714/6.
- SEMARNAT. (2015) *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México*, Ciudad de México: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Disponible en https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Informe15_completo.pdf
- Sheikh A., Jamal Y. (2009). *Machining of polymer composites*. Abu Dhabi: Springer. Disponible en <https://doi.org/10.1007/978-0-387-68619-6>
- Singh R., Singh N., Fabbrocino F., Fraternali F., Ahuja I.P.S. (2016). Waste management by recycling of polymers with reinforcement of metal powder. *Composites part B: Engineering*, 105, p. 23-29. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836816314500>
- Stanton T., Kay P., Johnson M., Chan F. (2021). *WIREs Water*. 8, p.1490. Disponible en <https://doi.org/10.1002/wat2.1490>
- Tišler-Korljan B., Gregor-Svetec D. (2014). Properties and printability of compression moulded recycled polyethylene. *Materials and Design*. 55, p. 583–590. Elsevier. Disponible en <https://daneshyari.com/article/preview/829571.pdf>
- Zuccheratt Vieira & Braccini F. (2017). Synthetic gravel for concrete obtained from Sandy iron tailing and recycled polyethyltherephtalate. *Construction and Buildin Materials*. 151. p. 859-865. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061817312758>