



Vigilada Mineducación

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES TÉRMICAS, REOLÓGICAS Y
MECÁNICAS DE MEZCLAS ENTRE HDPE VIRGEN CON HDPE
RECICLADO.

Evaluation of thermal, rheological and mechanical properties of virgin and recycle
HDPE blends

JUAN CAMILO GÓMEZ SANDOVAL

Tesis de grado

Asesor,

Sandra Milena Gonzalez

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍAS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA

RESUMEN

Cada día los procesos de manufactura se están enfocando en disminuir sus desperdicios, en pro de una economía circular, que permita mitigar el impacto ambiental y su huella de carbono, es así como se busca disminuir los residuos sólidos de los procesos evitando que lleguen a una disposición final en un relleno sanitario, dándoles un nuevo ciclo de vida. Por este motivo, las propiedades reológicas, térmicas, morfológicas y mecánicas del polietileno de alta densidad (HDPE) son estudiadas, en mezclas virgen/reciclado a partir de la implementación de un proceso de reciclaje mecánico de guías plásticas, empleadas como dispositivos de acople en moldes de yeso usados en la industria cerámica.

Se realiza la limpieza de los materiales y su reducción de tamaño de partícula, para posteriormente analizarlas con una espectroscopía FTIR, para determinar sus grupos funcionales, siendo estos correspondientes a HDPE. Luego de esto, se procede a analizar sus propiedades reológicas por medio de un MFI, del cual se encuentra una disminución en la fluidez al reciclar el material. Mientras que, para las propiedades térmicas, a partir de un TGA y DSC, se identifica la pérdida de estabilidad térmica de las guías recicladas. Finalmente se generan mezclas (70/30 y 50/50) a partir de un proceso de inyección, para conformar las probetas y evaluar sus propiedades mecánicas, en donde se determina que tanto el módulo de elasticidad, como el esfuerzo máximo soportado, decrecen a medida que se incrementa el contenido de material reciclado. Morfológicamente se encuentra a partir de un análisis SEM, que se generan concentradores de esfuerzos y contaminaciones en las piezas inyectadas al mezclar material virgen con reciclado.

A pesar de estas pérdidas en sus propiedades, se demuestra la viabilidad de realizar mezclas con material virgen y reciclado, siendo útil aún para múltiples aplicaciones, debido a que los esfuerzos mecánicos y cargas térmicas a las que son sometidas estas guías no generan fallos en el proceso en el que son empleadas como mecanismos de acople.

Palabras clave: Reciclaje, polietileno de alta densidad, caracterización, FTIR, SEM, TGA, DSC, MFI

ABSTRACT

Every day the manufacturing processes are focusing on reducing their waste, in favor of a circular environmental economy, which will mitigate the environmental impact and its carbon footprint, this is how it seeks to reduce solid waste from the processes, preventing it from reaching a final disposal in a sanitary landfill, providing a new life cycle. For this reason, the rheological, thermal, morphological and mechanical properties of high-density polyethylene (HDPE) are studied in virgin/recycled blends from the implementation of a mechanical recycling process of plastic guides used as a coupling device in plaster molds used in the ceramic industry.

The materials are cleaned and reduced particle size, and then analyzed with FTIR spectroscopy to determine their functional groups, which are corresponding to HDPE. After this, its rheological properties are analyzed with the MFI, from which a decrease in the fluidity is found when recycling the material. While, for the thermal properties, from a TGA and DSC, the loss of thermal stability of the recycled guides is identified. Finally, blends (70/30 and 50/50) are generated from an injection process, to shape the specimens and evaluate their mechanical properties, where it is determined that both, the modulus of elasticity and the maximum stress supported, decrease as increasing the content of recycled material. Morphologically, it is found from a SEM analysis, that stress concentrators and contamination are generated in the injected parts by mixing virgin material with recycled material.

Despite these losses in their properties, the feasibility of making blends with virgin and recycled material is demonstrated, still being useful for multiple applications, due to the fact that the mechanical stresses and thermal loads to which these guides are supported, do not generate failures in the process in which they are used as coupling mechanisms.

Keywords: Recycling, high-density polyethylene, characterization, FTIR, SEM, TGA, DSC, MFI

INTRODUCCIÓN

El uso de polímeros se ha incrementado exponencialmente en el mundo durante el último siglo, generando impactos ambientales negativos en vertederos, fuentes hídricas y océanos, que son por lo general, los lugares donde terminan su ciclo de vida, por lo que son considerados productos con una gran huella de carbono. En Colombia, durante el año 2020, se consumieron 1.33 millones de toneladas de materiales plásticos, diferentes resinas plásticas son usadas en diferentes sectores como empaques y envases, construcción, agricultura, institucional, entre otros, de las cuales se puede destacar el polietileno de alta densidad (HDPE), que generó un consumo aparente de 190 mil toneladas, correspondiente a un 14.28% de dicho año. [1]

Del total de la producción anual de productos plásticos, 750.000 Ton son destinadas al sector de empaques y envases, de las cuales solo el 40% tienen viabilidad técnica y económica para ser aprovechadas por medio de reciclaje mecánico. Sin embargo, la realidad es que en Colombia se recicla tan solo un 20% de este valor, por lo que proyectos como, el Plan Nacional de Economía Circular para los polímeros motiva a las industrias a acogerse a esta economía circular. [2]

Es así como una reconocida empresa dedicada a la fabricación de piezas cerámicas plantea el reciclaje de unas guías plásticas empleadas como dispositivos de acople en moldes de yeso, las cuales son elaboradas a partir de HDPE y su consumo mensual es de 30 mil unidades aproximadamente, que luego de cumplir con la vida útil del molde, son desechadas y generan una disposición aproximada de 400 Kg anualmente a los vertederos de la ciudad. Este material aún conserva muchas de sus propiedades, además de ser ideal para realizar un proceso de reciclaje, con el fin de tener una industria sostenible mitigando su impacto ambiental. Sin embargo, diversas limitaciones se ven enfrentadas debido al proceso de manufactura al que están ligadas, donde son contaminadas con yeso y aceites desmoldantes que pueden hacer complejo su reciclaje mecánico.

Por lo anterior, el objetivo de este estudio es determinar el efecto que tiene el uso industrial de estas guías plásticas sobre las propiedades físicas, mecánicas y reológicas, además de

evaluar la viabilidad técnica de realizar diferentes mezclas de polietileno de alta densidad virgen (vHDPE) con reciclado (rHDPE).

MATERIALES

Los materiales usados para este trabajo fueron guías “vírgenes”, que son aquellas que no han sido usadas dentro del proceso de producción. Guías “recicladas”, que son las obtenidas como residuos sólidos luego de ser empleadas como dispositivos de acople en el proceso industrial, que son sometidas a agentes desmoldantes como aceites hidrosolubles y temperaturas de procesamiento cercanas a los 70°C durante 16 horas. Adicionalmente, se usa polietileno de alta densidad virgen (vHDPE) M80064S del proveedor Sabic Co. en pellets, que posee un MFR de 8.0 g/10 min (190°C y 2.16 kg), con una densidad de 964 kg/m³, para realizar las mezclas que fueron inyectadas para realizar los análisis de las propiedades mecánicas.

MÉTODOS

3.1 Selección de material. El proceso inicia con la recolección, inspección y separación del material reciclado resultante del proceso de producción, donde se separa del yeso remanente de los moldes cerámicos y se selecciona para su reciclaje.

3.2 Medición de la densidad aparente. La densidad aparente se mide tanto en las guías plásticas vírgenes como recicladas, siguiendo la norma ASTM D1895-17, método B.

3.3 Limpieza y secado. Luego de la selección del material se realiza una etapa de lavado en la que se tiene como objetivo retirar todas las impurezas del material, eliminando trazas de yeso, aceites y diferentes contaminantes del proceso de producción. Para esto se realiza una inmersión en una solución detergente, compuesta por Soda Caustica o Hidróxido de Sodio (NaOH), en un 2% de concentración.

Para evitar problemas en los métodos de transformación posteriores se requiere que el material tenga un bajo porcentaje de humedad, para ello se realiza un proceso de escurrido y secado a 60 °C en un horno de convección durante 6 horas.

3.4 Molienda. Luego del secado de las piezas, se pesan 2 kg de material, para llevarlas al proceso de molienda con el fin de reducir su tamaño de partícula en un molino de cuchillas. Se obtiene un porcentaje de pérdida promedio del 2,55%. Esta molienda se realiza tanto para las guías recicladas como las guías “vírgenes”, esto con el fin de poder realizar las diversas técnicas de caracterización además de preparar el material para ser mezclado con el material virgen.

3.5 FTIR. Para determinar el tipo de material, tanto de las guías vírgenes como de las recicladas, se realiza una espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier, la cual fue realizada en el espectrómetro Spectrum Two de Perkin Elmer, por medio del espectro de absorción molecular en la región infrarroja, en un rango desde los 4000 cm^{-1} hasta los 400 cm^{-1} .

3.6 Propiedades Reológicas

3.6.1 MFI. La viscosidad fundida del material virgen y reciclado fue estudiada mediante el ensayo MFI o índice de fluidez, dicho estudio de la reología del polímero fundido fue realizado en el equipo MFI-1211 de la marca JJ-TEST, según la norma ASTM D1238-13, método A, con una temperatura de 190°C y una carga añadida de 2,16 Kg, con el fin de determinar la fluidez de material y la facilidad de procesabilidad.

3.7 Propiedades Térmicas

3.7.1 TGA. Para el análisis termogravimétrico de este caso de investigación, se emplea como programa térmico una rampa de calentamiento de 20.00°C/min hasta los 800°C en el equipo TGA Q500 del fabricante TA Instruments.

3.7.2 DSC. La calorimetría diferencial de barrido se realizó en el equipo DSC Q200 del fabricante TA Instruments, bajo una atmósfera controlada con nitrógeno, con una rampa de calentamiento de 10°C/min. Tres ciclos fueron usados para cada muestra, donde en el primer ciclo se lleva la muestra desde 0 °C hasta 200 °C, para eliminar su historia térmica, para luego disminuir su temperatura nuevamente finalizando el segundo ciclo. En el tercer ciclo se realizó con la misma rampa de calentamiento del primero. Los termogramas que se muestran en esta investigación corresponden al segundo y tercer ciclo. El grado o índice de cristalinidad se obtiene de la relación entre las entalpías de fusión de las muestras con la entalpía de fusión de HDPE 100% cristalino (292.6 J/g). [3]

3.8. Preparación de las mezclas de polímeros. A partir de los materiales obtenidos en la molienda (escamas), se realizan 2 mezclas vHDPE/rHDPE con proporciones de 50%/50% y 70%/30% para ser comparadas con la muestra 100% vHDPE como se especifica en la tabla 1. Esta cantidad de mezclas se determina de acuerdo con evidencias en diferentes estudios que sugieren mezclas no mayores al 50%. [5,6]

3.9. Inyección de probetas. Para este ensayo se emplea la inyectora de la marca Euro Inj referencia D-75SU, con un tiempo de ciclo total de 54 segundos a temperaturas de boquilla de 200°C, Zona 1: 190°C, Zona 2: 180°C y Zona 3: 170°C, en donde se cargaron las mezclas previamente pesadas con las cuales se realizan 12 ciclos de inyección para cada una de las mezclas vHDPE/rHDPE para un total de 24 probetas por muestra que fueron posteriormente

separadas de sus canales de alimentación. Estas probetas fueron inyectadas de acuerdo con la norma técnica ISO 527- 2019.

3.10. Propiedades mecánicas. Para el ensayo de tracción y el cálculo del módulo de Young se emplea la máquina universal INSTRON 3366 con una velocidad de aplicación de la carga de 50 mm/min a temperatura ambiente siguiendo la norma ASTM D638 IV, tomando 5 probetas de cada una de las mezclas conformadas para cada ensayo.

3.11. Análisis morfológico SEM. Para el análisis morfológico se emplea el microscopio electrónico de barrido Phenom G2 Pro Desktop SEM, para el cual fue necesario cortar muestras de 1 cm x 0,5 cm que fueron congeladas en una atmósfera de nitrógeno para ser cubiertas con una capa de Au-Pd a una potencia de 10 mA por 1 minuto, con el fin de volver la muestra conductora.

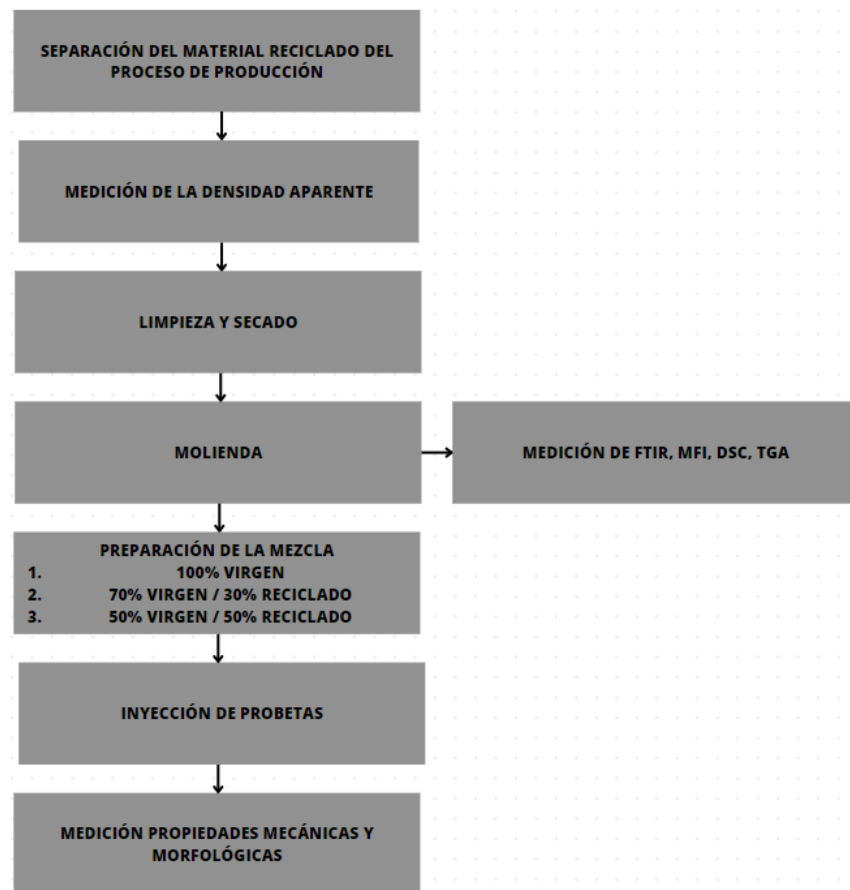


Figura 1. Procedimiento de experimentación

RESULTADOS

4.1 Densidad aparente.

Se obtiene una densidad aparente para las guías “vírgenes” promedio de 0,254 g/ cm³ mientras que para las guías “recicladas” se tiene una densidad promedio de 0,35 g/cm³. Este incremento del 38% en su densidad aparente se debe las trazas de contaminantes como yeso, aceite y otros residuos del proceso industrial en el que son empleadas.

Guías vírgenes			Guías recicladas		
Masa [g]	Volumen [mL]	Densidad [g/cm ³]	Masa [g]	Volumen [mL]	Densidad [g/cm ³]
127	500	0,254	175,6	500	0,3512
126,9	500	0,2538	174,7	500	0,3494
127	500	0,254	175,4	500	0,3508

Tabla 1. Densidades de las guías vírgenes y recicladas

4.2 FTIR.

Para determinar el tipo de material de las guías recicladas se realiza una espectroscopia FTIR, como se muestra en la figura 2, además de identificar si luego del proceso de producción de la fabricación de moldes, se presenta alguna alteración en los grupos funcionales en el espectro resultante.

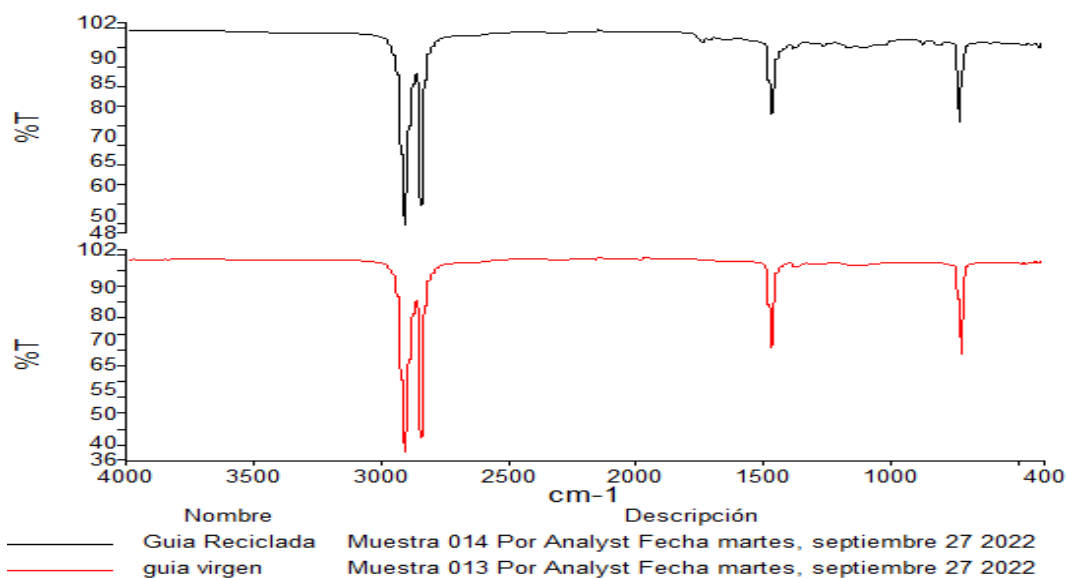


Figura 2. Espectro FTIR para las muestras de guías vírgenes y recicladas.

Se aprecia en ambas muestras 3 picos de metileno (CH₂) característicos en transmitancia que aparecen a los 730 cm⁻¹, 1470 cm⁻¹, 2917 cm⁻¹ y 2849 cm⁻¹ que, comparados en las bases de datos del equipo, corresponden a polietileno de alta densidad (HDPE) [7,8]. No se evidencian diferencias significativas entre los dos espectros, salvo en el rango del espectro de la huella dactilar en la guía reciclada, generado por las trazas de contaminantes como yeso y aceite empleado como desmoldante en el proceso de fabricación de moldes de yeso. Tampoco se aprecian degradaciones del material reciclado.

4.3 Propiedades Reológicas

4.3.1 MFI.

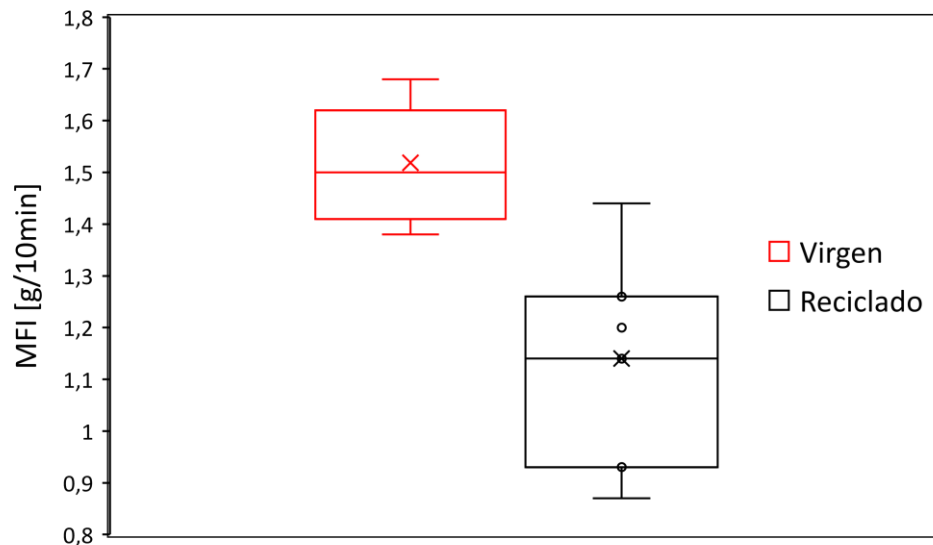


Figura 3. MFI para guías vírgenes y recicladas.

El índice de fluidez permite evaluar la reología de las muestras de HDPE a través de una medida indirecta de la viscosidad. En la figura 3 se aprecia que los valores más altos se presentan con el material virgen, con un promedio de 1.52 g/10min, mientras que, por su parte, el material reciclado, presentó un promedio de 1.14 g/10min. Demostrando así un aumento en la viscosidad del material reciclado (rHDPE), alteración reológica que es atribuida a las contaminaciones y degradaciones generadas en el proceso industrial en el que son usadas. [6,9,11,15]

4.4 Propiedades Térmicas

4.4.1 TGA.

Para determinar la estabilidad térmica del HDPE virgen y luego del proceso de reciclaje, se realiza un análisis termogravimétrico. Con este método de caracterización es posible determinar los efectos de dicho proceso al que son sometidas las muestras, pudiendo afectar sus propiedades y desempeño, como se puede apreciar en la figura 4a en la que se tiene al vHDPE con una degradación del 99.99% a los 530°C aproximadamente, con 1.7%/°C como rata de pérdida de peso máxima, mientras que para la figura 4b correspondiente al rHDPE, presenta una degradación del 99.74% a los 550°C, con una pendiente de pérdida de peso más acelerada, al tener una rata de pérdida de peso máxima de 2.2%/°C, demostrando diferencias asociadas a la presencia de impurezas o aditivos como aceites, que generan una menor estabilidad térmica para el material reciclado. [9, 10,16]

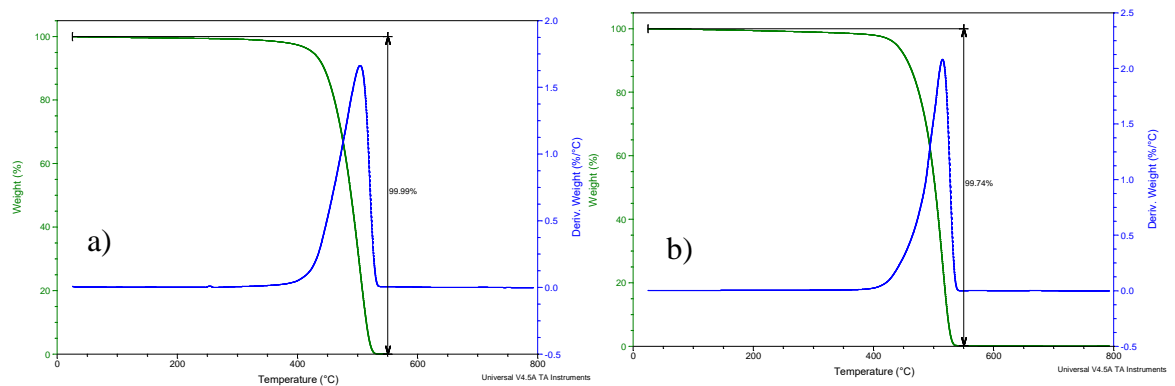


Figura 4. TGA para las muestras de HDPE virgen (a) y de HDPE reciclado (b)

4.4.2 DSC

Los termogramas de la calorimetría diferencial de barrido (DSC), se emplean para la determinación de las propiedades físicas y químicas del material a través de la cantidad de calor que absorbe o libera la energía durante el calentamiento o enfriamiento. En este caso, para el calentamiento, que está descrito en la Figura 5, se aprecia que tanto para la muestra virgen se obtienen valores similares en su temperatura de cristalización (T_c) con un valor de

114°C, sin embargo, la entalpía de cristalización (ΔH_c) para la muestra reciclada es menor, con un valor de 141.2 J/g mientras que 181.2 J/g es el valor para la guía virgen. En la Figura 6 se aprecia el termograma para el enfriamiento, en el cual se identifica la temperatura de fusión (T_m) para el material reciclado de 128.16°C y 127.01°C para el material virgen, con entalpías de fusión (ΔH_f) menor en el material reciclado, con un valor de 134.9 J/g frente a 161.8 J/g del material virgen, que corresponden a un índice de cristalización del 46% para el rHDPE y 55% para el vHDPE, lo que indica que hay más cadenas poliméricas alineadas en el material virgen que en el reciclado, dando como resultado una mayor resistencia cuando se someten a deformación. Esta reducción en la cristalinidad es dada por el proceso industrial al que son sometidas las guías. [3, 4, 6, 9, 12,13,15]

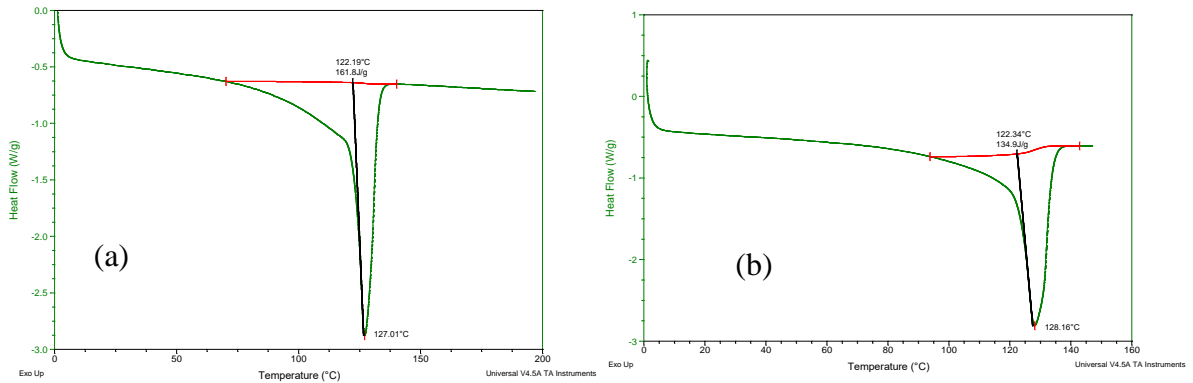


Figura 5. Curvas DSC de calentamiento para las muestras de HDPE virgen (a) y de HDPE reciclado (b)

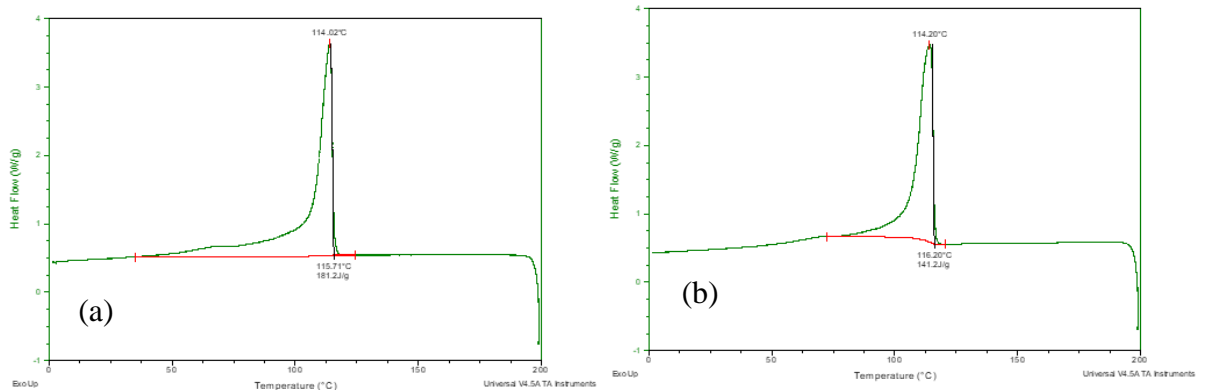


Figura 6. Curvas DSC de enfriamiento para las muestras de vHDPE (a) y rHDPE (b)

4.5 Propiedades Mecánicas.

4.5.1 Ensayo de Tracción

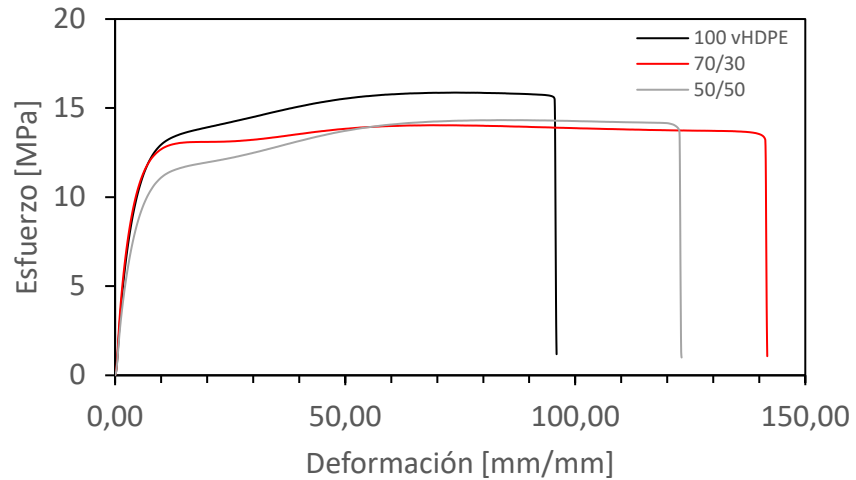


Figura 7. Curva de esfuerzo-deformación para las muestras de vHDPE y de las mezclas vHDPE/rHDPE.

Como resultado del ensayo de tracción se obtiene la figura 7, en donde se encuentra que el esfuerzo para las probetas con material 100% virgen, es mayor con respecto a las mezclas con material reciclado, dichas diferencias corresponden a un 6% con una adición del 30% en peso de rHDPE y 16% para la mezcla con 50% en peso de rHDPE. Es así como se ve una pérdida en la resistencia a la tracción entre más contenido en peso de material reprocesado se adiciona a la mezcla, generando adicionalmente una mayor deformación antes de su fractura. [5,6,13,17]

4.5.2 Modulo de Young

Complementando la evaluación de las propiedades mecánicas de las probetas evaluadas, se calcula el módulo de Young para las 3 diferentes muestras a partir de las pendientes del esfuerzo vs deformación como se aprecia en la figura 8, evidenciando un menor módulo a mayor contenido de material reciclado. Estas

diferencias corresponden a una disminución de 19% para la mezcla 70/30 y 32% para 50/50 con respecto al HDPE 100% virgen. [3,6,9,15]

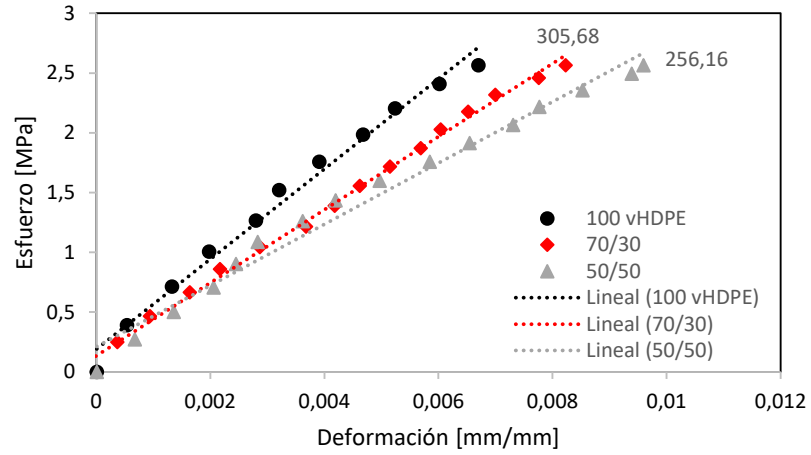


Figura 8. Módulo de Young para las muestras de vHDPE y de las mezclas vHDPE/rHDPE.

4.6 Análisis Morfológico

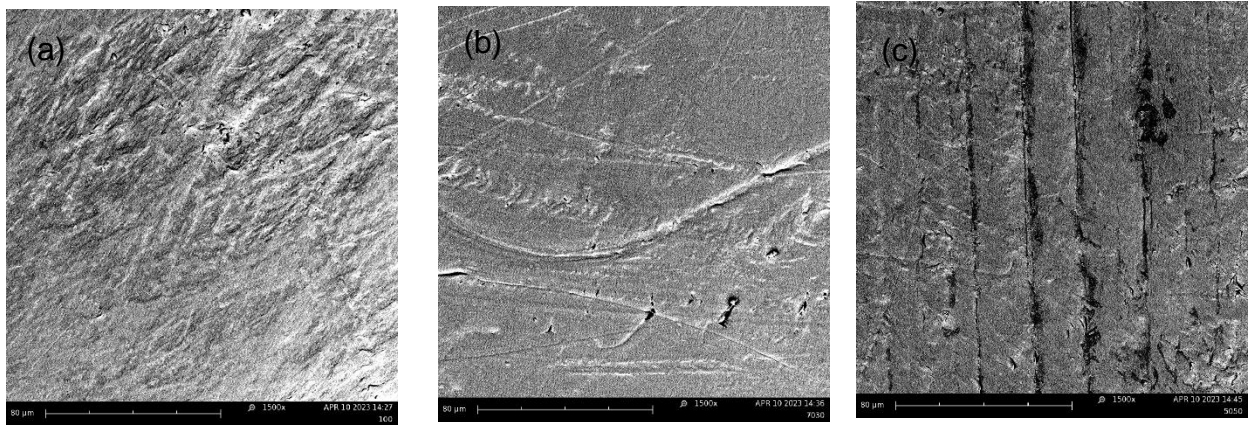


Figura 9. Imágenes SEM (1500x) para las mezclas vHDPE/rHDPE. (a) vHDPE (b) 70 vHDPE / 30 rHDPE (c) 50 vHDPE / 50 rHDPE

El análisis morfológico se realiza a través de micrografías SEM, empleado para entender la organización estructural y de composición de las muestras analizadas. En la figura 9, se puede apreciar para el material 100% vHDPE, que no se tienen contaminaciones, pero si una superficie rugosa comparada las otras muestras. Para el

caso de la mezcla 70/30, se empiezan a evidenciar contaminaciones y una superficie menos rugosa, pero con la aparición de imperfecciones pronunciadas a lo largo de la muestra. Finalmente, para la mezcla 50/50, se encuentran concentradores de esfuerzo marcados en toda su superficie, explicando la disminución en sus propiedades mecánicas. [4, 9, 13, 14]

CONCLUSIONES

Los materiales poliméricos como el HDPE, con un amplio potencial para ser reciclados, pueden ser utilizados nuevamente implementando un proceso de reciclaje mecánico, con una adecuada selección y limpieza, para de esta manera retirar las alteraciones en sus propiedades y contaminaciones generadas por los procesos industriales que pueden inducir a pérdidas en el desempeño del material.

Este estudio para reciclaje de las guías plásticas recicladas del proceso industrial cerámico demuestra que, si bien en el FTIR los grupos funcionales corresponden a HDPE, no se ven contaminaciones o cambios significativos con respecto a las guías plásticas vírgenes. Por otra parte, se ve una pérdida en la fluidez a través del MFI y las propiedades térmicas a partir de las técnicas de caracterización como el DSC y TGA, en las que se evidencia una afectación en su cristalinidad y estabilidad, lo que demuestra que las cargas y esfuerzos térmicos a los que son sometidas las guías alteran sus propiedades.

Basado en los resultados de los ensayos de tracción, se encuentra que es posible realizar mezclas entre material virgen y reciclado. Sin embargo, esto genera una disminución en sus propiedades mecánicas. Se encuentra que, a mayor cantidad de material reciclado, menor será su esfuerzo máximo soportado, al igual que su módulo de Young. No obstante, estos valores siguen siendo adecuados para el uso actual que se les está dando industrialmente.

Así mismo, morfológicamente se aprecia en las micrografías que entre mayor sea el contenido de material reciclado, mayores serán sus concentradores de esfuerzos, contaminaciones y diferencias de fases evidenciadas en su superficie.

REFERENCIAS

- [1] Acoplasticos. (2022). Plásticos en Colombia 2021-2022 (51st ed.)
- [2] Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). Plan Nacional para la Gestión Sostenible de los Plásticos de un solo Uso
- [3] Awad, A. H., Aly Abd El-Wahab, A., El-Gamsy, R., & Abdel-Atif, M. H. (2019). A study of some thermal and mechanical properties of HDPE blend with marble and granite dust. *Ain Shams Engineering Journal*, 10(2), 353–358. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2018.08.005>
- [4] Fazli, A., & Rodrigue, D. (2021). Phase morphology, mechanical, and thermal properties of fiber-reinforced thermoplastic elastomer: Effects of blend composition and compatibilization. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 41(7-8), 267–283. <https://doi.org/10.1177/07316844211051749>
- [5] Tesfaw, S., Olawale, S. F., Mulatie, T., & Titilayo Akinlabi, E. (2021). Investigation of Compositional Effects of Virgin and Recycled HDPE on Mechanical Properties of Pipe. *E3S Web of Conferences*, 309, 01005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202130901005>
- [6] Zhang, J., Hirschberg, V., & Rodrigue, D. (2022). Blending Recycled High-Density Polyethylene HDPE (rHDPE) with Virgin (vHDPE) as an Effective Approach to Improve the Mechanical Properties. *Recycling*, 8(1), 2. <https://doi.org/10.3390/recycling8010002>
- [7] Erbetta, C. D., Silva, M. E. S., Freitas, R. F., & Sousa, R. G. (2021). Accelerated aging and characterization of HDPE pin type insulators

(15 kV). *Polymers and Polymer Composites*, 29(9_suppl), S1641–S1648. <https://doi.org/10.1177/09673911211047682>

[8] Kartikey Kumar Gupta, Chandra, H., Sagar, K., Kamal Kant Sharma, & Devi, D. (2023). Degradation of high-density polyethylene (HDPE) through bacterial strain from Cow faeces. 48, 102646–102646. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102646>

[9] Pedroso, A. G., & Rosa, D. S. (2005). Mechanical, thermal and morphological characterization of recycled LDPE/corn starch blends. *Carbohydrate Polymers*, 59(1), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2004.08.018>

[10] Gaduan, A. N., Li, J., Hill, G., Wallis, C., Christoph Burgstaller, & Lee, K.-Y. (2023). Simulating the recycling of milk bottles in the UK: Influence of blending virgin and repeatedly melt-extruded high-density polyethylene. 189, 106734–106734. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106734>

[11] Techawinyutham, L., Tengsuthiwat, J., Srisuk, R., Techawinyutham, W., Mavinkere Rangappa, S., & Siengchin, S. (2021). Recycled LDPE/PETG blends and HDPE/PETG blends: mechanical, thermal, and rheological properties. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 2445–2458. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.09.052>

- [12] Aggarwal, Saroj & Sajwan, Madhuri & Singh, Ran. (2008). Crystallinity of HDPE Pipes by DSC, XRD and FTIR Spectroscopy - A Forensic Comparison. *Indian Journal of Criminology and Criminalistics*. 29. 141-148.
- [13] Esmizadeh, E., Naderi, G., Bakhshandeh, G. R., Fasaie, M. R., & Ahmadi, S. (2017). Reactively compatibilized and dynamically vulcanized thermoplastic elastomers based on high-density polyethylene and reclaimed rubber. *Polymer Science, Series B*, 59(3), 362–371. <https://doi.org/10.1134/s1560090417030046>
- [14] Fazli, A., & Rodrigue, D. (2021). Phase morphology, mechanical, and thermal properties of fiber-reinforced thermoplastic elastomer: Effects of blend composition and compatibilization. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 41(7-8), 267–283. <https://doi.org/10.1177/07316844211051749>
- [15] Alzerreca, M., Paris, M., Boyron, O., Orditz, D., Louarn, G., & Correc, O. (2015). Mechanical properties and molecular structures of virgin and recycled HDPE polymers used in gravity sewer systems. *Polymer Testing*, 46, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2015.06.012>
- [16] Anto, T., & Rejeesh, C. R. (2022). Synthesis and characterization of recycled HDPE polymer composite reinforced with nano-alumina particles. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.190>

- [17] Hallack, V., de Paula, L., Mottin, A., Moreira, L., & Freire, R. (2021). Evaluation of mechanical properties of mixtures of virgin and recycled high-density polyethylene. *Proceedings of the 16th Brazilian Polymer Conference, 16° CBPOL*, 1569–1573.