

# Estudio de un material compuesto a base de Polietileno de Tereftalato (PET) reforzado con Virutas de Acero y Aluminio

Delkis Vergara, Licenciada en Ingeniería Naval <sup>1</sup>, Leopoldo Ruíz, Doctorado en Ingeniería Mecánica <sup>2</sup>, y Nacari Marín, Doctorado en Ingeniería Mecánica y Organización Industrial <sup>3</sup>

<sup>1 y 3</sup> Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá, [delkis.vergara@utp.ac.pa](mailto:delkis.vergara@utp.ac.pa) [nacari.marin@utp.ac.pa](mailto:nacari.marin@utp.ac.pa),

<sup>2</sup> Universidad Autónoma de México, México, [leopoldo.ruiz@icat.unam.mx](mailto:leopoldo.ruiz@icat.unam.mx)

*Abstract—This article presents the development of a composite material based on Terephthalate Polyethylene (PET) and steel and aluminum metal chips, from the process used for the manufacture of plates (probes), to the realization of computed tomography and tests of tension. Although the results of resistance of the material have been lower compared to those presented by a virgin PET material, this study has allowed to define the conditions of the manufacturing process of the plates. According to the surface texture obtained, it is planned to use the compound in covers, table tops and non-structural applications, which is why its mechanical and structural behavior is initially studied, emphasizing the reuse of waste in new applications in collaboration with the decrease of global pollution.*

**Keywords--** Composite material, polymer, PET, CT scan, tensile strength.

**Resumen-** En este artículo se presenta el desarrollo de un material compuesto a base de Polietileno de Tereftalato (PET) y virutas metálicas de acero y aluminio, desde el proceso empleado para la fabricación de placas (probetas), hasta la realización de tomografía computarizada y ensayos de tensión. A pesar de que los resultados de resistencia del material han sido menores respecto a los que presenta un material PET virgen, este estudio ha permitido definir las condiciones del proceso de fabricación de las placas. Acorde a la textura superficial obtenida, se prevé utilizar el compuesto en cubiertas, sobres de mesas y aplicaciones no estructurales, motivo por el cual se estudia inicialmente su comportamiento mecánico y estructural, enfatizando la reutilización de los desechos en nuevas aplicaciones en colaboración a la disminución de la contaminación mundial.

**Palabras Claves--** Material Compuesto, polímero, PET, tomografía computarizada, ensayo de tensión.

## I. INTRODUCCIÓN

Las grandes cantidades de plásticos de un sólo uso que se desechan, sugiere la necesidad de su reutilización, por lo que la combinación con otros materiales que les permitan mejores propiedades y aplicaciones más perdurables, se identifica como una estrategia deseable [1].

El estudio y desarrollo de materiales compuestos con base en materiales de desecho, es una alternativa para la reutilización de materiales que comúnmente son dispuestos en vertederos o bien al medio ambiente [2]. Sin embargo, cada combinación de materiales impone retos en el desarrollo de

procesos de fabricación, que incluyen, entre otros, si existe o no miscibilidad entre los materiales a mezclar [3].

El Polietileno de Tereftalato es un material termoplástico aromático descubierto en 1929 por Whinfield y Dickson, fabricado como fibra en 1941 e inicia su comercialización en 1953. Desde entonces, es conocido como PET o PETE por sus siglas en inglés. El PET virgen es considerado uno de los polímeros ingenieriles más importantes de las últimas décadas, por su amplia variedad en aplicaciones como contenedores de líquidos consumibles, no-consumibles, alimentos, detergentes, entre otros. Más del 50% de las aplicaciones del PET componen productos de un solo uso [4] [5] [6].

Desechos de botellas y recipientes PET son destinados a procesos de reciclaje, para ser aprovechados en diferentes áreas [7]. Un estudio termogravimétrico realizado por Beata Jabłońska [8], presentó el uso del PET como recurso energético, puesto que su composición elemental es apta para extracción de biomasa por su poder calorífico de 13.2 MJ/kg, lo que permite la combustión y deja abierta la posibilidad de mezcla con otros materiales.

El PET, una vez que inicia el proceso de reciclaje mecánico (triturado) se le denomina rPET (Recycling PET) [9]. El rPET presenta variación en sus propiedades y características, sin perder la clasificación como polímero termoplástico [10]. La degradación natural del rPET mantiene una velocidad mayor a la del PET, debido a la cantidad de veces que ha sido reciclado y reprocesado [11]. Se ha reportado en mezclas con rPET una sensibilidad a la degradación hidrolítica y térmica, así como menor peso molecular [12]; características que provocan cambios en las propiedades mecánicas generales del material [13].

Actualmente, el rPET se mezcla con otros materiales [12] como el PET virgen, el Policarbonato (PC), el Polietileno de alta densidad (HDPE), el Polietileno de baja densidad (LDPE), en presentaciones de hojuelas, pellets o una combinación de ambos. De acuerdo a Jankauskaite, V. [13], cuando el rPET se mezcla con empaques de aluminio desechados, evidencia una alta estabilidad coalescente, lo que mejora la unificación de los materiales, con una mejor

dispersión del aluminio dentro de la matriz polimérica, fabricándose un compuesto reforzado.

Los materiales compuestos fabricados con matriz polimérica se conocen como PMCs (de las siglas en el idioma inglés de *Polymer Matrix Composites*). Estos materiales cuentan con un alta rigidez, resistencia y poco peso, características que motivan a investigadores de la industria automovilística y aeroespacial, ya que en estas áreas se busca la reducción de emisiones y consumo de energía en procesos sustentados en un estudio de unificación de la teoría de fallas y producción de material compuesto de matriz polimérica unidireccional [13].

Las virutas metálicas se obtienen de procesos de mecanizado, siendo el torneado el más común y el que genera las virutas de mejor longitud. En la zona de cizallamiento, se genera la mayor concentración de calor y produce cambios en el rendimiento del material, es decir a las virutas [14]. La orientación y distribución de las virutas dentro de la matriz, se realiza aleatoriamente, para procurar la isotropía del material.

Este trabajo presenta la construcción y caracterización de probetas para ensayos mecánicos de tracción, elaborados con hojuelas de rPET con virutas metálicas tanto de acero inoxidable como de aluminio.

## II. FABRICACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO

El rPET a utilizar, es una mezcla de envases de PET de un solo uso con diferente coloración. Las virutas metálicas son segmentadas discontinuas en forma de espiral.

Ambos materiales, se colocan procurando intercalar capas de hojuelas rPET y de virutas, hasta llenar el molde en porcentaje de masa. Las virutas segmentadas y de dimensiones irregulares se vierten de forma aleatoria.

El colocar material de refuerzo (en este caso las virutas) supone aumentar el valor de la resistencia mecánica y añadir soporte a la transferencia de esfuerzos. La resistencia estructural general del compuesto es proporcionada por la matriz polimérica.

Se desarrolló el molde con una base 250 x 160 x 5 mm y una tapa 272 x 180 x 3 mm, para fabricar el compuesto.

El material a fabricar incluye los siguientes materiales de desecho:

- A. rPET, previamente triturado de forma mecánica.
- B. Virutas metálicas segmentada, procedentes de procesos de mecanizado en seco (procesos que no incluyen el uso de refrigerante).

Con el objetivo de determinar las condiciones iniciales de fundición del compuesto, se consideró la temperatura de fusión del rPET (Grado alimenticio) equivalente a 251.2 °C reportada en las referencias [13][15]. Los parámetros definidos de tiempo de fusión equivalente a 1 hora 50 minutos, porcentaje en masa de rPET y virutas metálicas

60/40%, se variaron en función de ensayos previamente experimentados y estudios referenciados [16][17].

El molde para fundición se fabricó en aluminio 6061 y se emplearon barras cilíndricas rectificadas y endurecidas en cada esquina para asegurar el desplazamiento alineado de la tapa con respecto a la base. Se utilizaron masas de acero sobre la tapa de 8.15 kg., para generar la compactación del compuesto durante el proceso de fundición. Se incluyeron también pinzas de presión colocadas para asegurar la unión entre la base y la tapa del molde.

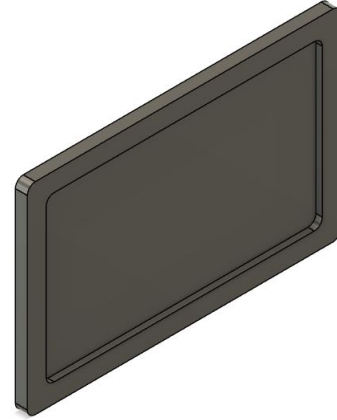


Fig. 1 Base del molde.

El molde fabricado se diseñó para obtener placas de material compuesto, con una distribución de 5 probetas para ensayos de tensión por placa.

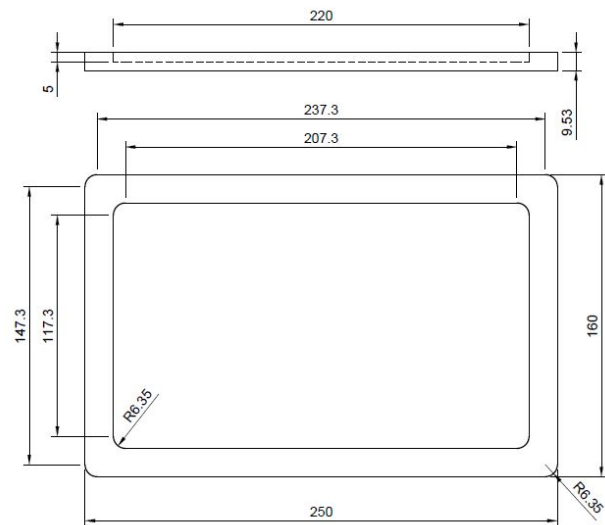


Fig. 2 Molde (mm).

Durante la fundición, el rPET como matriz se funde a gran velocidad provocando la generación de gases y atrapando burbujas en el material resultante. El uso de masas superpuestas al molde, permitió reducir la presencia de burbujas en la estructura de la matriz.

Las mejores condiciones identificadas para fabricar la matriz polimérica, fueron obtenidas en el ensayo número 19 (Ver Fig. 2). El proceso de fundición fue el más estable, obteniéndose una mejor textura, configuración mecánica y mejor manejo del enfriamiento de la placa. A continuación se muestran las condiciones asumidas durante la fundición del ensayo 19:

Con base en los resultados experimentales y las condiciones recomendadas [13][15][16][17], para el proceso de fundición de este material son:

- Secado de hojuelas por 6 horas, a 160° C.
- Aplicación de desmoldante (Mann Ease Release 200) tanto a la base como a la tapa del molde.
- Precalentamiento del molde a 215°C, durante 1 hora 30 minutos.
- Regulación de la masa de rPET 60% y virutas metálicas 40%. Calentamiento del horno de 215°C a 285°C, en un tiempo de 30 minutos.
- Fundición del compuesto a 285°C por espacio de 1 hora 50 minutos.
- Enfriamiento desde 285°C hasta alcanzar la temperatura ambiente.
- La extracción de la placa del molde se realiza a temperatura ambiente.

## II. DESCRIPCIÓN DE ENSAYOS

Durante la fundición, las probetas fabricadas cambian de coloración azul a verde. Esto sucede durante el enfriamiento, tal y como se muestra en la figura 3.

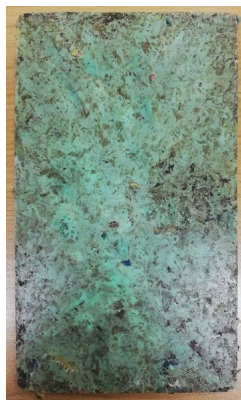


Fig. 3 Ensayo 19, matriz polimérica fundida.

Tras realizar la fundición, se procedió a verificar la estructura interna de los ensayos 8, 10, 11, 19, 20 mediante tomografía computarizada. Esta técnica de inspección no-destruccionista, permite establecer las condiciones estructurales internas a nivel microscópico. De las imágenes obtenidas mediante este análisis, se verificó la presencia de burbujas de aire dentro del material. La figura 5, presenta una

imagen de una probeta obtenida del ensayo 20, 390 g en masa de rPET, 15 gramos de virutas de acero.

El porcentaje de porosidad obtenido fue de 15%. La medida de poro de mayor tamaño en la probeta fue de aproximadamente 18 micrómetros. La porosidad reflejada, disminuye con una fundición más efectiva; a mayor compactación menor porosidad.

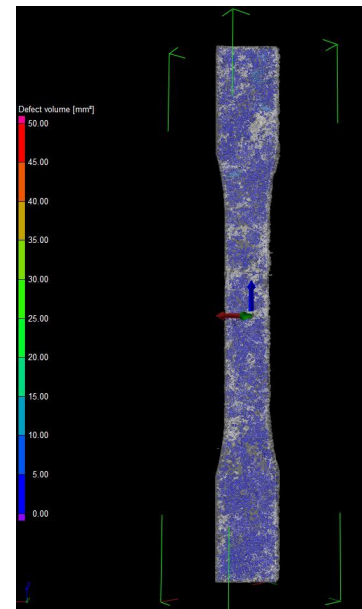


Fig. 5 Análisis tomográfico de probeta reforzada con acero.

El ensayo de tensión en probetas de rPET y virutas metálicas, se llevó a cabo en una máquina de ensayos SHIMADZU GCMS-QP2010 SE. La tensión ensayada en el compuesto de matriz polimérica se desarrolló en dirección uniaxial, temperatura ambiente, ajuste manual de mordazas y análisis mediante software.

Al realizar ensayos de tensión a las probetas de rPET y virutas metálicas se obtuvieron valores entre  $4.233 \times 10^{-3}$  y  $4.741 \times 10^{-1}$  MPa. Estos valores son bajos respecto a los presentados por otros materiales compuestos con base polimérica. En Ardekani, S. M.[18] se estudia una matriz polimérica reforzada con fibra de papel periódico, obteniéndose valores en torno a 21 y 32.5 MPa. La diferencia en valores se debe respecto al material rPET empleado (dependencia de la cantidad de veces reciclado y la temperatura, así como la degradación del rPET), al material de la fibra, la disposición en la matriz y el porcentaje de masa, por mencionar algunos. A pesar de que los resultados de resistencia del material han sido menores respecto a los que presenta un material PET virgen y las obtenidas por un material compuesto con base rPET y fibras de papel periódico, este estudio ha permitido definir las condiciones del proceso de fundición de las placas de matriz rPET y virutas metálicas.

En la figura 6, se muestra la gráfica de esfuerzo-deformación obtenida a partir del ensayo de probetas de material compuesto de base rPET y virutas metálicas. En la figura 7, se muestran curvas de referencia del comportamiento que se espera presente el material compuesto respecto a las curvas de esfuerzo-deformación del material de la matriz y el material de refuerzo, analizados por separado.



Fig.6 Gráfica Esfuerzo-Deformación, material compuesto de rPET y virutas metálicas.

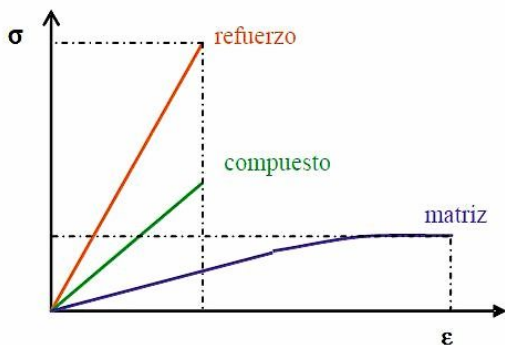


Fig. 7 Curva Esfuerzo-Desplazamiento idealizada, material compuesto reforzado [19].

#### IV. RESULTADOS

Los datos presentados en este estudio, permiten definir condiciones de fundición para generar un compuesto de base rPET con refuerzos de virutas provenientes de procesos de mecanizado. Se presenta con el análisis de resultados previos, con el objetivo de verificar la utilización del compuesto base rPET y virutas metálicas como material compuesto en la fabricación de productos. Entre los estudios realizados, el análisis mediante tomografía computarizada revela la necesidad de mejorar el proceso de fundición para reducir la porosidad [20].

La prueba de tensión aplicada a 6 probetas pertenecientes a las placas resultado de los ensayos de fundición número 27, 28 y 29, logró revelar que el compuesto se encuentra en condiciones cercanas de las mínimas identificadas de un compuesto polimérico, sin identificar uniformidad en los resultados. Los refuerzos en el compuesto se incorporan en la

matriz, reflejando que la orientación aleatoria permite mayor resistencia antes de la fractura. Sin embargo, se identifica que el estudio de la cristalinidad de la matriz permitirá modificar las condiciones de fragilidad del compuesto. También se identificó que la humedad en las hojuelas de rPET tiene efecto en los resultados de resistencia mecánica obtenidos. Al analizar de manera general los resultados presentados, revelan que se requieren realizar actividades de optimización, lo que permitirá identificar mejores condiciones para la fabricación.

#### V. DISCUSIÓN

El termoplástico PET como el rPET son higroscópicos y las condiciones tropicales ambientales de Panamá, dificultan el proceso de secado de forma natural. Por este motivo, en primer lugar se procedió al secado del rPET triturado mediante un horno por convección.

El proceso de fundición que busca unificar el compuesto, debe disponer de un sistema de compresión para lograr una compactación efectiva. Al superponer masas sobre el molde se logró una disminución en la aglomeración de burbujas de aire y se obtuvo un mejor acabado superficial en las placas.

Se recomienda incluir nuevos ensayos de caracterización mecánica, como ensayos de compresión y de dureza, los que permitirán conocer mejor el comportamiento mecánico del material compuesto presentado en este trabajo. El ensayo de compresión permitirá revelar la deformación capaz de producirse en el material compuesto, mientras que el de dureza refleja la resistencia superficial a la ralladura, provocado por otro material.

Entre las aplicaciones potenciales para el compuesto se proponen como reemplazo del material utilizado en cubiertas, sobres de mesas y aplicaciones no estructurales, al generarse una superficie lisa aún sin realizar un proceso de compactación adecuada.

#### CONCLUSIÓN

El compuesto a base de rPET y virutas metálicas, procura una alternativa para aprovechar materiales de un sólo uso que se desechan y ocuparlos como materia prima para aplicaciones más duraderas. El resultado de utilizar matriz rPET combinada con virutas metálicas, muestra capacidad de unificación entre los dos materiales empleados, peso ligero y valores de tensión, aunque bajos, permiten verificar la necesidad de continuar con el estudio para optimizar el proceso de fundición del material compuesto.

En los experimentos ensayados, se logró identificar las condiciones de fundición del material compuesto, así como la necesidad de optimizar el proceso de fabricación por hallazgo de humedad en las hojuelas de rPET y burbujas de aire atrapadas dentro de la estructura del compuesto.



Si bien las condiciones de gas atrapado al interior de las probetas estudiadas, indica la presencia de una importante cantidad de poros, estas fueron consistentes tanto en el ensayo con rPET sin virutas metálicas y rPET con virutas metálicas, por lo que los autores identifican que esta condición puede mejorar al cambiar las condiciones de proceso de unión entre ambos materiales.

Se continuarán realizando actividades relacionadas con este estudio, a fin de mejorar el tratamiento de la materia prima previo a la fundición, particularmente limpiando y controlando la humedad contenida y posteriormente actuando sobre el proceso de obtención de láminas mediante un mejor control de la presión para la compactación ejercida, así como la distribución de tamaño y proporción de viruta metálica añadida al rPET.

#### AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento especial a la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) de Panamá, por el financiamiento aportado a la realización de este estudio. De igual forma queremos agradecer al Laboratorio Nacional de Manufactura Aditiva y Digital (MADiT), de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México, por el apoyo en la realización de estudios de caracterización mecánica de materiales compuestos base PET. Agradecemos a la Universidad Tecnológica de Panamá, en particular, a la Facultad de Ingeniería Mecánica por el apoyo brindado a esta investigación desde la Coordinación de Postgrado y del Programa de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mecánica.

#### REFERENCIAS

1. Sonam, C., Prasad, Y. B., Anwar, S. N., & Kumar, C. S. (2019). Mathematical modelling and analysis of plastic waste pollution and its impact on the ocean surface. *Journal of Ocean Engineering and Science*.
2. Grau, J., Terraza, H., Velosa, R., Milena, D., Rihm, A., & Sturzenegger, G. (2015). *Solid Waste Management in Latin America and the Caribbean*. Inter-American Development Bank: Washington, DC, USA.
3. Demirel, B., Yaraş, A., & Elçiçek, H. (2011). Crystallization behavior of PET materials.
4. Lepoittevin, B., & Roger, P. (2011). Poly (ethylene terephthalate). *Handbook of Engineering and Speciality Thermoplastics*, 3, 97-126.
5. Dasan, K. P. (2015). PET Nanocomposites: Preparation and Characterization. In *Poly (Ethylene Terephthalate) Based Blends, Composites and Nanocomposites* (pp. 99-111). William Andrew Publishing.
6. Kannan, G., Grieshaber, S. E., & Zhao, W. (2016). Thermoplastic polyesters. *Handbook of Thermoplastics*, 41, 319.
7. Duarte, I. S., Tavares, A. A., Lima, P. S., Andrade, D. L., Carvalho, L. H., Canedo, E. L., & Silva, S. M. (2016). Chain extension of virgin and recycled poly (ethylene terephthalate): effect of processing conditions and reprocessing. *Polymer degradation and stability*, 124, 26-34.
8. Jabłońska, B., Kielbasa, P., Korenko, M., & Drózd, T. (2019). Physical and chemical properties of waste from PET bottles washing as a component of solid fuels. *Energies*, 12(11), 2197.
9. Elamri, A., Zdiri, K., Harzallah, O., & Lallam, A. (2017). Progress in Polyethylene Terephthalate Recycling. In *Polyethylene Terephthalate:*

Uses, Properties and Degradation (pp. 155-186). Nova Science Publishers, Inc New York.

10. Ioakeimidis, C., Fotopoulou, K. N., Karapanagioti, H. K., Geraga, M., Zeri, C., Papathanassiou, E., ... & Papatheodorou, G. (2016). The degradation potential of PET bottles in the marine environment: An ATR-FTIR based approach. *Scientific reports*, 6(1), 1-8.
11. Ioakeimidis, C., Fotopoulou, K. N., Karapanagioti, H. K., Geraga, M., Zeri, C., Papathanassiou, E., ... & Papatheodorou, G. (2016). The degradation potential of PET bottles in the marine environment: An ATR-FTIR based approach. *Scientific reports*, 6(1), 1-8.
12. Ragaert, K., Delva, L., & Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, 69, 24-58.
13. F. Awaja y D. Pavel, «Recycling of PET», *Eur. Polym. J.*, vol. 41, n.o 7, pp. 1453-1477, 2005
14. Morán González, J. L. (2000). Efectos térmicos en mecanizado de piezas de acero al carbono (Doctoral dissertation, Navales).
15. Jankauskaite, V., Macijauskas, G., & Lygaitis, R. (2008). Polyethylene terephthalate waste recycling and application possibilities: a review. *Mater Sci (Medžiagotyra)*, 14(2), 119-127.
16. Hassan, N. N., Ismail, N. M., Ghazali, S., & Nuruzzaman, D. M. (2018, April). Thermal properties of polyethylene reinforced with recycled-poly (ethylene terephthalate) flakes. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 342, p. 012094).
17. Gomez, W., Plata, D., Ramos, J., Morales, M., Osorio, S., Rodríguez, J., ... & Meza, E. (2014). Análisis de la degradación térmica mezclas de Poli Tereftalato de Etileno Reciclado (R-PET/PET) proveniente de botellas de bebidas carbonatadas de consumo popular en la ciudad de Cartagena. *Revista Colombiana de Materiales*, (5), 93-99.
18. Ardekani, S. M., Dehghani, A., Al-Maadeed, M. A., Wahit, M. U., & Hassan, A. (2014). Mechanical and thermal properties of recycled poly (ethylene terephthalate) reinforced newspaper fiber composites. *Fibers and Polymers*, 15(7), 1531-1538.
19. Mariano, M. (2011). *Tecnología de los Plásticos*. Blog dedicado a los materiales plásticos, características, usos, fabricación, procesos de transformación y reciclado
20. Casado, L. (2011). *Experimental and computational micromechanical study of fiber-reinforced polymers* (Doctoral dissertation, PhD thesis, Universidad Politécnica de Madrid).
21. Chen, P. E. (1971). Strength properties of discontinuous fiber composites. *Polymer Engineering & Science*, 11(1), 51-56.
22. Miravete, A. (2012). *Materiales compuestos II*. Editorial Reverte.
23. Nonato, R. C., & Bonse, B. C. (2016). A study of PP/PET composites: Factorial design, mechanical and thermal properties. *Polymer Testing*, 56, 167-173.
24. Farah, S., Kunduru, K. R., Basu, A., & Domb, A. J. (2015). Molecular weight determination of polyethylene terephthalate. In *Poly (Ethylene Terephthalate) Based Blends, Composites and Nanocomposites* (pp. 143-165). William Andrew Publishing.
25. Maure, J., Candanedo, M., Madrid, J., Bolobosky, M., & Marín, N. (2018). Fabricación de ladrillos a base de polímeros PET y virutas metálicas. *Revista De Iniciación Científica*, 4, 33-38.
26. V. Jankauskaitė, G. Macijauskas, y R. Lygaitis, «Polyethylene Terephthalate Waste Recycling and Application Possibilities: a», *Rev. Mater. Sci. Medžiagotyra*, pp. 119-127.
27. Y. Chen et al., «Yield and failure theory for unidirectional polymer-matrix composites», *Compos. Part B Eng.*, vol. 164, pp. 612-619, 2019.
28. Girija, B. G., Sailaja, R. R. N., & Madras, G. (2005). Thermal degradation and mechanical properties of PET blends. *Polymer Degradation and stability*, 90(1), 147-153.
29. Miranda, W. M. V., Los Chasquis, A., & Payamino, R. GUÍA PARA ELABORAR PROBETAS DE MATERIAL COMPUESTO: RESINA POLIÉSTER COMO MATRIZ POLIMÉRICA Y CASCARILLA DE ARROZ COMO REFUERZO.