

Implementación de polímeros termoplásticos reciclados como materia prima potencial para procesos de manufactura aditiva

| Fecha de recibido: 14 de julio 2023 | Fecha de aprobado: 26 de agosto 2023 |

| Reception date: July 14, 2023 | Approval date: August 26, 2023 |

| Data de recebimento: 14 de julho de 2023 | Data de aprovação: 26 de agosto de 2023 |

Brallan Esteban Martínez Quiroga

ORCID 0009-0003-4929-9891
bemartinezq@sena.edu.co

Técnico en Modelado 3D para la Industria
Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), Colombia
Rol del investigador: teórico y escritura
Grupo de investigación GIMES

Technician in 3D Modeling for Industry
National Apprenticeship Service (SENA), Colombia
Role of the researcher: theoretical and writing
GIMES research group

Técnico em Modelação 3D para a Indústria
Serviço Nacional de Aprendizagem (SENA), Colombia
Papel do investigador: teórico e redação
Grupo de investigação GIMES

María Isabel Arévalo Ramírez

ORCID 0000-0002-0602-0729
miarevalo@sena.edu.co

Ingeniera Química
Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), Colombia
Rol del investigador: teórico y escritura
Grupo de investigación GIMES

Chemical Engineer
National Apprenticeship Service (SENA), Colombia
Role of the researcher: theoretical and writing
GIMES research group

Engenheiro Químico
Serviço Nacional de Aprendizagem (SENA), Colombia
Papel do investigador: teórico e redação
Grupo de investigação GIMES

Maribel Reyes Hernández

ORCID 0009-0001-6676-7023
mreyes689@soy.sena.edu.co

Especialización en Ingeniería de Producción
Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), Colombia
Rol del investigador: teórico y escritura
Grupo de investigación GIMES

Specialization in Production Engineering
National Apprenticeship Service (SENA), Colombia
Role of the researcher: theoretical and writing
GIMES research group

Especialização em Engenharia de Produção
Serviço Nacional de Aprendizagem (SENA), Colombia
Papel do investigador: teórico e redação
Grupo de investigação GIMES

Cómo citar este artículo: Martínez Quiroga, B. E., Arévalo Ramírez, M. I., y Reyes Hernández, M. (2023).

Implementación de polímeros termoplásticos reciclados como materia prima potencial para procesos de manufactura aditiva. *Ciencia y Poder Aéreo*, 19(1), 100-111 <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.802>



Implementación de polímeros termoplásticos reciclados como materia prima potencial para procesos de manufactura aditiva

Implementation of recycled thermoplastic polymers as potential raw material for additive manufacturing process

Implementação de polímeros termoplásticos reciclados como potencial matéria-prima para processos de fabrico aditivo

Resumen: En los últimos años se ha hecho evidente la problemática ambiental que gira en torno a los polímeros sintéticos, en especial los que son desechados al medio ambiente después de su vida útil. Por tal motivo, este trabajo de investigación se centra en la implementación de polímeros reciclados en tecnologías emergentes, como lo es la manufactura aditiva. Para esto se emplearon polipropileno, polietileno de alta densidad y polietileno de baja densidad reciclados, y se realizó la comparativa con materiales vírgenes de estos. Se realizó la selección, molienda, lavado y secado de los materiales recuperados, para su posterior transformación por proceso de extrusión, en donde se obtuvieron *pellets* de dichos materiales, los cuales fueron alimentados a un equipo de manufactura aditiva en el que se obtuvieron probetas para la caracterización mecánica y microestructural. Hasta el momento se han logrado obtener resultados con el polipropileno reciclado y original debido a que la investigación aún se encuentra en curso. Se observó que el polietileno reciclado presenta mayor adhesión a la cama de impresión y alta contracción en comparación con el original. Además, se presentan dificultades de impresión para el polietileno de alta densidad reciclado y original.

Palabras clave: extrusión; deposición fundida (MDF); polímero reciclado; prototipado.

Abstract: In recent years, the environmental problems that revolve around synthetic polymers have become evident, especially those that are discarded into the environment after their useful life. For this reason, this research work focuses on the implementation of recycled polymers in emerging technologies such as additive manufacturing. For this, recycled polypropylene, high-density polyethylene and low-density polyethylene were used and a comparison was made with their virgin materials. The selection, grinding, washing and drying of the recovered materials was carried out, for their subsequent transformation by extrusion process, where pellets of said materials were obtained, which were fed to additive manufacturing equipment in which test tubes were obtained for the mechanical and microstructural characterization. Until now, results have been achieved with the recycled and original polypropylene because the research is still ongoing. It was observed that the recycled polyethylene presents greater adhesion to the printing bed and high shrinkage compared to the original. In addition, there are printing difficulties for the original and recycled high-density polyethylene.

Keywords: Extrusion; fused deposition modelling (FDM); recycled polymer; prototyping.

Resumo: Nos últimos anos, tornaram-se evidentes os problemas ambientais relacionados com os polímeros sintéticos, especialmente aqueles que são descartados no ambiente após a sua vida útil. Por este motivo, este trabalho de investigação centra-se na aplicação de polímeros reciclados em tecnologias emergentes, como o fabrico aditivo. Para o efeito, foram utilizados polipropileno reciclado, polietileno de alta densidade e polietileno de baixa densidade, e foi feita uma comparação com os seus materiais vírgens. Foi realizada a seleção, moagem, lavagem e secagem dos materiais recuperados, para a sua posterior transformação por processo de extrusão, onde se obtiveram pellets destes materiais, que foram alimentados a um equipamento de fabrico aditivo no qual se obtiveram provetes para caracterização mecânica e microestrutural. Até o momento, os resultados foram obtidos com o polipropileno reciclado e original, pois a pesquisa ainda está em andamento. Observou-se que o polietileno reciclado apresenta maior aderência ao leito de impressão e elevada retração em comparação com o original. Além disso, existem dificuldades de impressão para o PEAD reciclado e original.

Palavras-chave: extrusão; deposição por fusão (MDF); polímero reciclado; prototipagem.

Introducción

El consumo de plástico ha aumentado rápidamente en varios campos, lo que ha llevado a un aumento en la producción de residuos durante el siglo pasado (Turku *et al.*, 2018). En Colombia, el manejo de residuos plásticos es un problema controversial que nos lleva a buscar soluciones alternativas para su uso eficiente empleando nuevas tecnologías. Los colombianos producimos en promedio 1.4 millones de toneladas de plástico al año, de los cuales el 56 % son empaques, botellas y embalajes de todos los sectores productivos, de la cifra anterior, el 40 % se utiliza en la industria de alimentos y bebidas que llegan diariamente a manos de los consumidores (algo más de 313 mil toneladas) (Martínez, 2022). Según cifras del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), en el 2020 la tasa de reciclaje y nueva utilización fue de 14.46 % del total de residuos sólidos y productos residuales generados. Respecto a 2019, la tasa presentó un aumento de 2.1 puntos porcentuales (Martínez, 2022), lo que demuestra que en Colombia hay más personas y empresas que se preocupan por reciclar.

El problema ocasionado por los desechos plásticos en la actualidad ha generado que se busquen nuevas alternativas de fabricación de productos; sin embargo, existe una gran preocupación por los residuos generados de este tipo, ya que su tasa de degradación es muy baja, haciendo que estos se acumulan en los ecosistemas. Según datos del Programa para las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), se calcula que entre 19 y 23 millones de toneladas de plástico acaban cada año en lagos, ríos y mares, de los cuales menos del 10 % se recicla (Naciones Unidas, 2023).

Otro factor que afecta de manera directa a la acumulación de materiales plásticos en el ecosistema es que nuestros modelos de aprovechamiento de los recursos han sido hasta hace relativamente poco lineales, en donde todo lo que se fabrica y termina su vida útil es considerado desecho, el cual va a parar al medio ambiente acrecentando el problema actual (Morales *et al.*, 2023). Por esta razón, la economía circular se ha

convertido recientemente en un área de investigación en diseño sostenible, con la intención de mantener los materiales en uso durante tantos ciclos de vida como sea posible (Den Hollander *et al.*, 2017), lo que resulta en un beneficio para la sociedad y la economía en su conjunto, al reducir el uso del entorno natural como sumidero de desechos y disminuir la cantidad de materiales vírgenes empleados para las actividades económicas (Andersen, 2007).

La adopción de la economía circular también está impulsada por la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para minimizar el cambio climático, cerrar las brechas sociales y conservar la riqueza natural, entre otros aspectos que apoyan la reducción de la huella ecológica de la actividad humana (Gamez, 2015). Todas estas estrategias pretenden no solo promover el aumento en la tasa de reciclaje y aprovechamiento de residuos, sino también la búsqueda de alternativas innovadoras que generen un valor agregado a los sistemas de producción.

Por lo anterior, se hace de vital importancia la búsqueda de opciones para la implementación de estos materiales, bien sea con técnicas actuales o emergentes de fabricación como lo es la manufactura aditiva.

La manufactura aditiva es una técnica de creación de piezas a través de la adición de material capa a capa. Entre las tecnologías de impresión 3D más empleadas, se utiliza como coordenadas el control numérico por computadora (CNC), este es el caso de la técnica de deposición fundida (MDF) o *fused deposition modelling* (FDM). Para la transformación de material termoplástico por este método, es necesario que se implementen materias primas recuperadas, debido a la baja gama de materiales que se pueden emplear en este método, las cuales se encuentran limitadas a pesar de los avances tecnológicos en esta área (Jin *et al.*, 2020).

Esta tecnología se considera prometedora para la fabricación sostenible, debido a que brinda la oportunidad de ahorrar materias primas, aumentar la funcionalidad del producto, reducir el consumo de energía y también permite la producción bajo demanda de repuestos para reparación, en comparación con las

tecnologías sustractivas (Mani *et al.*, 2014). Esta técnica de fabricación permite la producción de artículos personalizados a precios bajos, ya que al no requerir moldes y herramientas especializadas estas son descontadas del valor final de la pieza, como sucede en el caso de la fabricación tradicional (Kristiawan *et al.*, 2021).

Los polímeros termoplásticos son los materiales más utilizados en las técnicas de modelado por deposición fundida debido a su alta procesabilidad, bajo costo, baja absorción de humedad y fácil manipulación (Kuo *et al.*, 2016). Entre los más empleados se encuentran el ácido poliláctico que ofrece ventajas como una impresión simple, una amplia variedad de colores y patrones, además de considerarse como “biodegradable”. Presenta algunos inconvenientes, como ser frágil y tener propiedades mecánicas débiles. La característica más importante de este material para la impresión 3D es su uso generalizado en la tecnología FDM debido a su bajo punto de fusión, falta de toxicidad, falta de irritación y biocompatibilidad (Liu *et al.*, 2019).

Otro material muy popular para impresión es el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), sin embargo, este presenta problemas al emplearse en prototipos, por lo tanto, debe imprimirse empleando una buena temperatura en la cama y pegamento, ya que es propenso a deformarse (Moradi *et al.*, 2023).

Dentro de las investigaciones recientes se evidencia la experimentación en el área de impresión 3D con diferentes materiales como lo son el tereftalato de polietileno con glicol (*polyethylene terephthalate with glycol* - PETG), polipropileno (*polypropylene* - PP), polietileno de baja densidad (*low-density polyethylene* - LDPE), polietileno de alta densidad (*high-density polyethylene* - HDPE) y poliestireno (*polystyrene* - PS), dando como resultado buenas propiedades de impresión y manejo. Además, menciona que el material con mejores características para este proceso es el HDPE, siendo el polímero con mejor manejo y acabados entre los materiales reciclados. Con un comportamiento similar se encuentra el PP, el cual no posee un diámetro tan uniforme como el HDPE, pero sí cercano al valor de 1.75mm siendo este un inconveniente para la impresión por FDM en cuanto a continuidad y necesitando

un sistema de supervisión adicional (Ramos Espinosa y Lombana Gómez).

Sin embargo, la fabricación de piezas empleando FDM no es perfecta, ya que pueden suceder fallos, lo que conlleva a que se generen desperdicios. Esto presenta una posibilidad de innovación en esta área, por tal motivo las investigaciones han buscado viabilizar el uso de residuos de impresión 3D como materia prima para la manufactura aditiva (Bossart *et al.*, 2020).

Existen investigaciones ya establecidas sobre la reutilización de algunos materiales como insumos para manufactura aditiva, este es el caso de la implementación de ABS reciclado obtenido de partes electrónicas, en donde se demostró que las piezas impresas elaboradas con material reciclado presentaron buenas características (Oliveira *et al.*, 2023). Algunos investigadores han optado por adicionar otros materiales a polímeros recuperados a fin de mejorar las propiedades de ambos materiales, un ejemplo de ello es la investigación realizada por Ahmed *et al.* (2020), en donde se mezcló PLA y arena de sílice en el que se evidenció que al aumentar la cantidad de esta última mejoraron las propiedades mecánicas del polímero recuperado. También, los estudios se han encaminado en la implementación de polímeros menos convencionales para impresión 3D, este es el caso del HDPE recuperado proveniente de barcos después de su vida útil, los cuales pueden transformarse en materiales aptos para el medio marino con tecnología de fabricación aditiva mediante impresión 3D, presentando buenas propiedades y demostrando que es posible emplear dicho material para el prototipado (Daniele *et al.*, 2023).

Esta investigación se centra en la implementación de materiales que aún no se encuentran destinados para la manufactura aditiva, entre estos se encuentran ciertos polímeros reciclados, principalmente, polipropileno reciclado (*recycled polyethylene* - RPP), polietileno de alta densidad reciclado (*recycled high-density polyethylene* - RHDPE) y polietileno de baja densidad reciclado (*recycled low-density polyethylene* - RLDPE), obtenidos en su gran mayoría de envases y empaques industriales. Por lo anterior, los materiales fueron sometidos a diferentes tipos de transformación, con el objetivo de conocer su comportamiento

mecánico y facilidad de impresión, a fin de que en un futuro estas puedan ser empleadas en la manufactura aditiva como materias primas.

Materiales y metodología

Materiales

En esta investigación se emplearon como materias primas *pellets* originales del PP marca Sebia, con punto de fusión de 220 °C y densidad de 0.90 g/cm³, HDPE marca Marlex, cuya densidad se encuentra en el rango de 0.91-0.97 g/cm³, punto de fusión entre 90 °C-140 °C, y LDPE marca Ecopetrol, con densidad de 0.915-0,925 g/cm³ y punto de fusión de 200 °C. Adicionalmente, se empleó material reciclado de envases y empaques de los polímeros mencionados anteriormente.

Equipos

Los equipos empleados en esta investigación son: lavadora termoacuosa Snap-on; molino granulador Shini, modelo SG-1621N, con potencia de 1500 W y 60 Hz de frecuencia; tolva presecaadora Moltech, modelo HHD-50 de 4.8 kW de potencia y frecuencia de 60 Hz; línea de extrusión peletizado de doble husillo, referencia PLA-30-30 y equipo de manufactura aditiva Tumaker NX Pro Pellets. Para los ensayos mecánicos se empleó una máquina universal de ensayos marca Besmax con celda de 5 toneladas y un durómetro para polímeros marca Check-Line con indentador. Se empleó un microscopio electrónico de barrido (SEM), marca Phenom GSR Desktop para los análisis microestructurales.

Preparación del material

Debido a que en este trabajo se emplearon materiales recuperados, se hace necesario realizar varias etapas para que este pueda ser transformado (figura 1).

La primera etapa es la recepción del material; en esta se realiza el acopio de todos los materiales plásticos que se desechan en el centro de materiales y ensayos del SENA, los cuales en su mayoría vienen de embalajes de alimentos (figura 1a).

En la segunda etapa se realiza la selección y clasificación del material. Dentro de la recuperación hay tres tipos de polímeros que destacan; RPP, RHDPE y RLDPE, para su identificación se tiene en cuenta la coloración al flexionar, facilidad de flectar, color de la llama, color de la ceniza y olor después de ser quemado. En el cual cada uno de los polímeros presenta un comportamiento característico (tabla 1).

Con los materiales debidamente seleccionados se da inicio a la tercera etapa, en donde se reduce el tamaño de cada polímero reciclado a 5 mm aproximadamente, empleando un molino granulador (figura 1c). En la siguiente etapa se elimina cualquier contaminante que pueda afectar la calidad final del material, para esto se emplea una lavadora termoacuosa, la cual por medio de un chorro de agua con detergente elimina partículas no deseadas, como se muestra en la figura 1d.

En la etapa final del proceso, se elimina toda la humedad que los materiales adquieren usando una tolva presecaadora. Se empleó una temperatura de 88 °C durante dos horas para cada material (figura 1e), teniendo en cuenta que el equipo empleado contiene temperaturas establecidas para el correcto secado de cada uno de los materiales poliméricos.

Tabla 1.
Datos para la caracterización de polímeros mediante prueba de la llama

Polímero.	Color a la flexión.	Dureza.	Color de la llama.	Olor al ser quemado.	Ceniza.
Polietileno de alta densidad.	Sin coloración.	Media.	Azul con amarillo.	Exosto.	Coloración amarilla.
Polietileno de baja densidad.	Sin coloración.	Baja.	Azul.	Vela.	Sin cambio de color.
Polipropileno.	Blanco.	Alta.	Amarillo.	Aromático.	Blanca lechosa.

Fuente: elaboración propia.

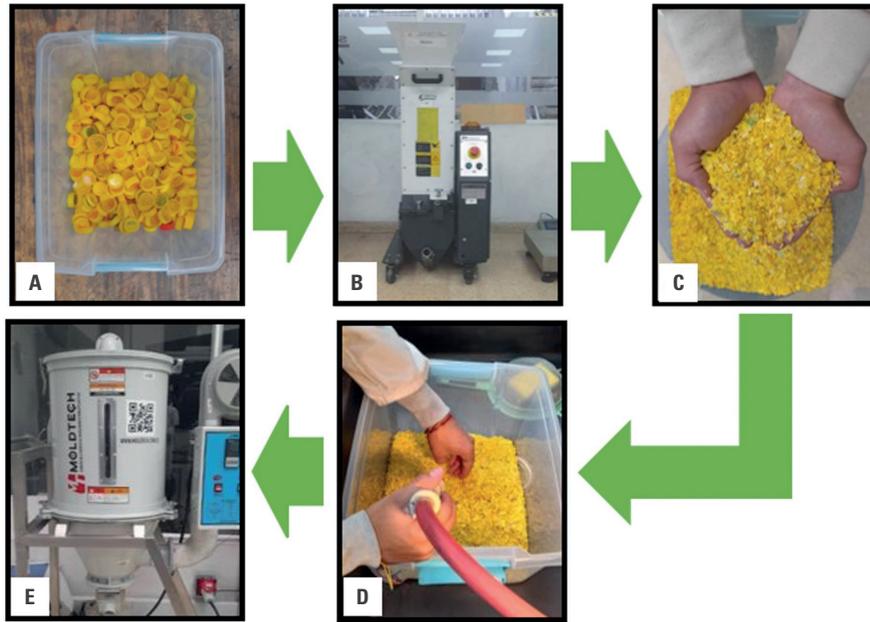


Figura 1. Etapas para el alistamiento del material

Nota: proceso de alistamiento de material recuperado. a) material reciclado de envases; b) molino granulador; c) material reciclado molido; d) lavado de material reciclado; e) secado de material.

Fuente: elaboración propia.

Proceso de extrusión-peletizado

Los materiales obtenidos (RPP, RLDPE y RHDPE) son transformados por separado empleando una máquina extrusora de doble tornillo. Este proceso inicia con el cargue del material en la tolva de alimentación, en donde este es llevado por los tornillos haciéndolo pasar por cada una de las zonas de temperatura,

generando un ablandamiento en el material, para ser impulsado a través de las boquillas de salida del equipo en forma viscoelástica obteniendo así hilos, seguido a esto se pasa por agua que está a temperatura ambiente (20 °C), para realizar el enfriamiento del material y posteriormente generar hilos, los cuales son cortados en cilindros de 5 mm con ayuda de una peletizadora, como se ilustra en la figura 2.

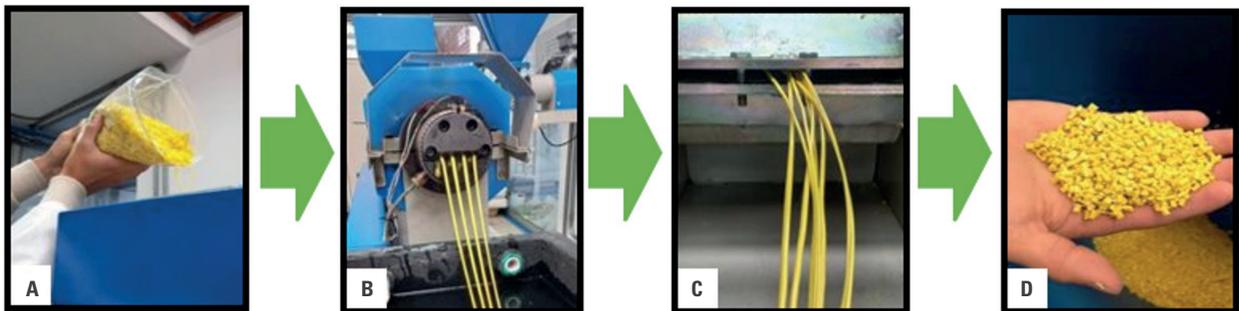


Figura 2. Etapas de extrusión y peletizado del material

Nota: proceso de transformación por extrusión de polímeros recuperados.

a) ingreso del material a la tolva de extrusión; b) extrusión de materia reciclado; c) filamentos para peletizado; d) peletizado material reciclado.

Fuente: elaboración propia.

Los parámetros de transformación en el proceso de extrusión para cada material se encuentran especificados en la tabla 2.

Tabla 2.
Parámetros de extrusión para materiales recuperados

RPP		RHDPE		RLDPE	
Zonas.	Temperatura (°C).	Zonas.	Temperatura (°C).	Zonas.	Temperatura (°C).
1.	50.	1.	50.		50.
2.	100.	2.	110.		80.
3.	130.	3.	130.		120.
4.	150.	4.	145.		150.
5.	175.	5.	175.		160.
Frecuencia de halador (Hz).	30.	Frecuencia de halador (Hz).	30.	Frecuencia de halador (Hz).	55.
Frecuencia de tornillo (Hz).	30.	Frecuencia de tornillo (Hz).	30.	Frecuencia de tornillo (Hz).	39.

Fuente: elaboración propia.

Proceso de modelado e impresión 3D

El proceso de impresión comienza con un diseño digitalizado en tres dimensiones que se puede obtener de diferentes maneras, una de ellas es empleando técnicas de modelado 3D. En esta investigación se utilizó el programa Rhino7 para generar el diseño tridimensional de las probetas para ensayos mecánicos, microestructurales y las diferentes geometrías que permitirán evaluar la facilidad de impresión de los materiales. Se emplearon las medidas establecidas por las normas ASTM D638 y ASTM D790 para el modelado de las probetas tipo corbatín y cuadrada.

Después de obtener el prototipo digitalizado, se procede a establecer parámetro de impresión haciendo uso del programa de impresión Simplify3D, para esto se cargan los archivos en formato .stl y se modifican los parámetros de impresión, como lo son la orientación de la pieza, porcentaje de relleno, altura de capa, velocidad de impresión, enfriamiento, y otros parámetros adicionales que garantizan una buena impresión. Finalmente, se obtiene un archivo gcode con todas las especificaciones, el cual es cargado a la plataforma de la máquina de prototipado (tabla 3).

Tabla 3.
Parámetros de impresión

Parámetros	Configuración
Temperatura de impresión inspección visual (°C).	210-230.
Temperatura de impresión (°C).	250-270.
Temperatura de cama (°C).	98-110.
Porcentaje de relleno.	100.
Orientación de impresión.	45°/-45°.
Dirección de construcción.	Plano, base mayor.
Altura de capa (mm).	0.15.
Tasa de extrusión Inspección visual.	100 %.
Diámetro de la boquilla (mm).	0.8.

Fuente: elaboración propia.

Con el modelo 3D cargado a la máquina, se procede a alimentar la tolva de la impresora con los pellets del material que se trabajará, para poder iniciar con la impresión. Este equipo cuenta con dos zonas de calentamiento, la primera sirve para preparar el material, calentarlo mediante resistencias e impulsarlo con la ayuda del tornillo sin fin, lo que permite su desplazamiento hacia la segunda zona donde se encuentra la temperatura más alta, la cual corresponde a la boquilla de salida de la máquina. Esta última zona se encarga de fundir el material para que al pasar por esta pueda manipularse, haciendo que se deposite en las coordenadas cartesianas dispuestas por el gcode (figura 3).

Ensayos mecánicos

Después de la obtención de las probetas para cada material, es necesario que se evalúen sus características mecánicas, para este fin se realizaron ensayos de tensión y dureza. La resistencia a la tensión de los materiales se determinó utilizando una máquina de ensayos universal con celda de 5 toneladas, a una velocidad de 5 mm/min y se emplearon para este ensayo las probetas tipo corbatín manufacturadas, cuyas medidas corresponden a la norma ASTM D 638, bajo características ambientales controladas en el laboratorio, siendo la temperatura ambiente de 20 °C y una humedad del 58 %.

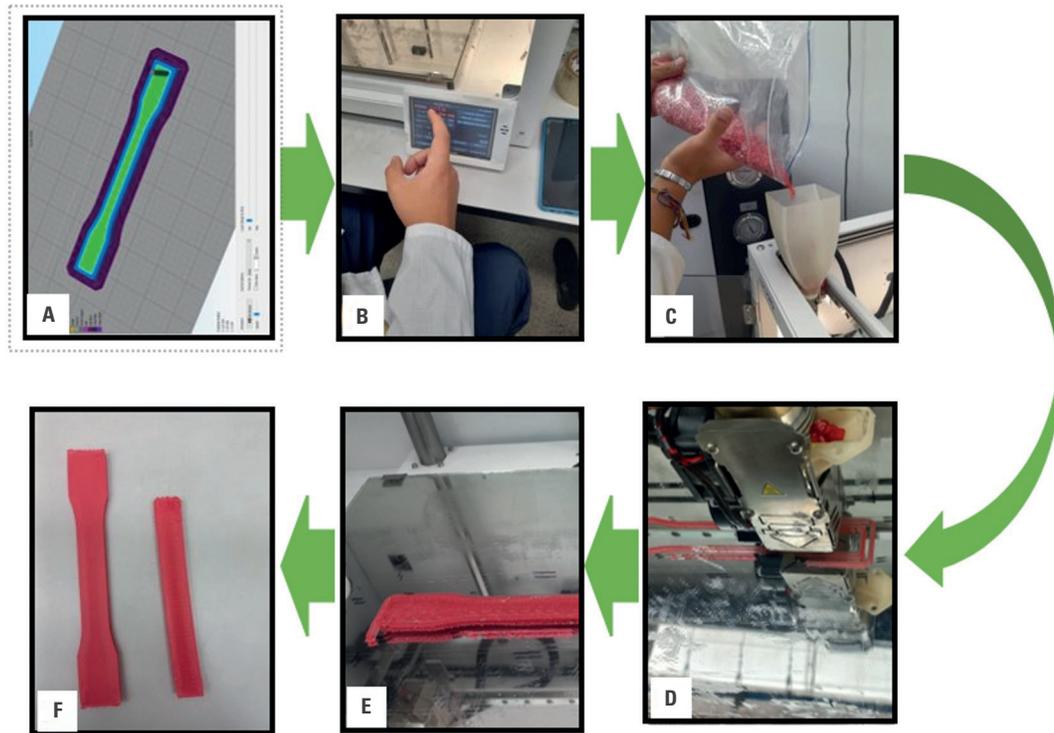


Figura 3. Etapas del proceso de modelado 3D

Nota: modelado e impresión 3D de probetas. a) modelo tridimensional de probetas; b) parámetros de impresión; c) cargue de material a la tolva de impresión; d) prototipado de probetas; e) comportamiento del material en impresión; f) prototipo final de probeta.

Fuente: elaboración propia.

Finalmente, se determinó la dureza del material en escala shore D, con un durómetro de polímeros. Para este ensayo se emplearon probetas cuadradas y se tomó su dureza en cinco puntos diferentes a lo largo del ítem.

Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Para las pruebas microestructurales se empleó un microscopio electrónico de barrido y se observó la zona cercana a la ruptura de cada material después de ser sometidas a esfuerzo. Se tomaron imágenes a 1000 aumentos, con una escala de 200 μm a la parte transversal, así como a la longitudinal, dichas escalas fueron asignadas de esa manera para obtener la mejor calidad de imagen referente a la zona de ruptura y en donde se visualiza mejor las características que este tiene.

Resultados y discusión

Teniendo en cuenta que la investigación se encuentra en curso, solo se cuentan con resultados parciales de algunos de los materiales empleados.

Procesos de extrusión y peletizado

El proceso de extrusión de los materiales empleados en esta investigación es un paso fundamental, a fin de obtener una buena calidad en las etapas posteriores. Esto se evidenció debido a que, si el peletizado obtenido al final del proceso presenta irregularidades en su tamaño (Figura 4b), este genera un conflicto en la fase de impresión, ya que no se cumple con el estándar establecido de alimentación de la prototipadora. Por lo

tanto, se requirió modificar velocidades en el halador, para obtener *pellets* con tamaños similares, para esto se tuvo en cuenta la fluidez del material y se realizaron diferentes pruebas modificando la frecuencia del halador entre la velocidad más baja, media y alta, obteniendo así que para el RPP y RHDPE se requirió emplear la frecuencia más baja, y para el RLDPE la más alta. Esto debido a que el RPP y el RHDPE son menos fluidos y presentan baja elasticidad, caso contrario de lo sucede con el RLDPE, sin embargo, en algunos casos se hizo necesario realizar este proceso de manera manual.

Proceso de modelado e impresión 3D

En esta investigación se trabajó con el mismo modelo 3D para los tres materiales. En cuanto al proceso de impresión se evidenció que la adhesión a la cama es mejor con el RPP que con el PP. En cuanto a la facilidad de impresión se observó que el PP tiene un comportamiento más apropiado que el RPP. Aunque ambos materiales tienen características similares, debido al reprocesamiento y posibles aditivos del RPP, este

presenta una mayor contracción en comparación con el PP (figura 5.). Se observó que el PP presenta una mejor fluidez que el RPP, esto puede deberse en parte a que la geometría del *pellet* del PP es más homogénea que el de RPP. Cabe resaltar que la configuración del peletizado del PP empleado en la investigación es esférica, mientras que la obtenida para el RPP es cilíndrica, lo que pudo interferir en el proceso de impresión.

En cuanto al HDPE y RHDPE se comprueba que no tiene una adherencia óptima para impresión (figura 6.), esto puede deberse en parte a que el material no llega a la temperatura de trabajo correcta, este parámetro se encuentra limitado en la máquina empleada, por lo tanto, no fue posible realizar pruebas con temperaturas superiores. Además, cuando el HDPE y el RHDPE son depositados en la cama por la boquilla, el material se rompe a medida que se va elongando, lo que dificulta la impresión, generando espacios que impiden la correcta adherencia entre capas. Se hace necesario investigar a fondo maneras en las que los tipos de materiales puedan ser empleados en la manufactura aditiva. Es importante tener en cuenta que



Figura 4. Peletizado de materiales recuperados
Nota: a) *pellets* de RHDPE; b) *pellets* de RPP; c) *pellets* de RLDPE
Fuente: elaboración propia.



Figura 5. Probeta cuadrada con PP y RPP
Nota: se evidencia que la contracción en el RPP es más alta que en el PP.
Fuente: elaboración propia.

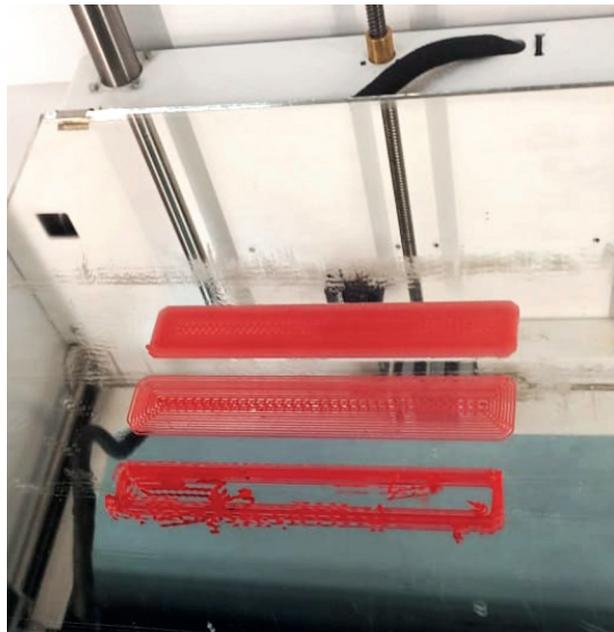


Figura 6. Pruebas de impresión con RHDPE
Nota: pruebas realizadas con diferentes parámetros de impresión.
Fuente: elaboración propia.

debido a que estos materiales provienen de otros procesos, como lo son la fabricación de embalaje industrial y se desconoce los posibles aditivos que estos puedan tener, es recomendable en futuras investigaciones que se realiza dicha estandarización, a fin de que estos materiales puedan ser óptimos para el prototipado por FDM.

Microscopía electrónica de barrido

En esta fase de la investigación se cuentan con los resultados de análisis microestructural del PP y RPP. Como se observa en la figura 1, en a y b se muestran zonas marcadas por el límite de grano, sin embargo, también se denotan partes que no lo presentan, correspondiente al comportamiento semicristalino del PP, mientras que si observamos en la misma figura 1, pero en la c y d no se encuentra definido el límite de grano, lo que se debe a que a medida que el material es sometido a diferentes transformaciones empleando calor, este es obligado a cambiar su morfología de frágil a dúctil (Vidakis *et al.*, 2020).

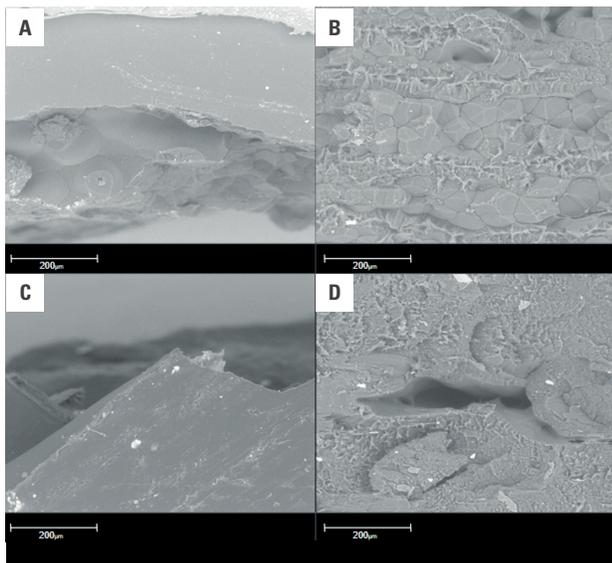


Figura 7. Ensayo de microscopía por barrido

Nota: fotografía del ensayo de microscopía electrónica de barrido.

a) sección longitudinal de PP; b) sección transversal PP;

c) sección longitudinal RPP; d) sección transversal RPP.

Fuente: elaboración propia.

Este análisis se realizó sobre la sección de la falla por ruptura del material después de los ensayos de tensión, en donde se puede apreciar que se generan más espacios (figura 1) en el proceso de impresión del RPP que del PP, esto también se pudo comprobar en el proceso de manufacturado, ya que se observaba que al imprimir con RPP en muchas ocasiones se generaba la ruptura del material, lo que puede llevar a que este tenga una menor resistencia a la tracción.

La ruptura del RPP que ocasiona concentradores de esfuerzo a lo largo del modelo impreso, es ocasionado principalmente por la pérdida de propiedades, como la viscosidad, ya que se desconoce cuántos reprocesamientos térmicos tuvo el material antes del proceso de extrusión e impresión empleados para esta investigación. Esto puede afectar la calidad final de las piezas, sin embargo, pueden realizarse mezclas con material original o incluso con otros polímeros que ayuden a contrarrestar el problema.

Conclusiones

Debido a la naturaleza de los resultados, se pudo evidenciar varias conclusiones sobre los materiales recuperados, desde el proceso de extrusión hasta su paso por la impresora 3D. Una de las primeras conclusiones es el comportamiento del polímero en su paso por la extrusora, hay heterogeneidad en los *pellets* de RLDPE, en comparación con los de RLDPE y RPP; aunque aún sigue en curso de investigación el mejoramiento de este proceso.

En segunda instancia, la adhesión del material en la cama de impresión es mucho mejor en el RPP que en el PP, no pudiendo ser comparable con lo que sucedió con el RHDPE, el HDPE, el LDPE y el RHDPE, siendo que no hubo ningún tipo de adhesión y, por el contrario, no fue posible su impresión por FDM.

Debido a que hasta el momento se cuenta con las probetas de RPP y PP se procederá a realizar ensayos mecánicos a estos materiales, en donde se espera evidenciar la pérdida de las propiedades del RPP debido a su reprocesamiento o uso de aditivos.

En cuanto al RHDPE, HDPE, RLDPE y LDPE se espera lograr en las siguientes etapas de la investigación que estos materiales puedan ser empleados en la manufactura aditiva, para ello se han investigado algunas alternativas de modificación a estos materiales, con el fin de mejorar su fluidez, viscosidad y reducir su punto de fusión, esto tentativamente se realizará adicionando otro tipo de materiales.

Referencias

- Ahmed, W., Siraj, S. & Al-Marzouqi, A. H. (2020). 3D printing PLA waste to produce ceramic based particulate reinforced composite using abundant silica-sand: Mechanical properties characterization. *Polymers*, 12(11), 2579. <https://doi.org/doi:10.3390/polym12112579>
- Andersen, M. S. (2007). An introductory note on the environmental economics of the circular economy. *Sustainability Science*, 2(1), 133-140. <https://doi.org/doi:10.1007/s11625-006-0013-6>
- Bossart, J. L., González, S. R. & Greenberg, Z. (2020). 3D printing filament recycling for a more sustainable library makerspace. *College & Undergraduate Libraries*, 27(2-4), 369-384. <https://doi.org/doi:10.1080/10691316.2021.1899093>
- Daniele, R., Armoni, D., Dul, S. & Alessandro, P. (2023). From nautical waste to additive manufacturing: Sustainable recycling of high-density polyethylene for 3D printing applications. *Journal of Composites Science*, 7(8), 320. <https://doi.org/doi:10.3390/jcs7080320>
- Den Hollander, M. C., Bakker, C. A. & Hultink, E. J. (2017). Product design in a circular economy: Development of a typology of key concepts and terms: Key concepts and terms for circular product design. *Journal of Industrial Ecology*, 21(3), 517-525. <https://doi.org/doi:10.1111/jiec.12610>
- Gamez, M. J. (2015). *Objetivos y metas de desarrollo sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Gómez, G. A. y Ramos, G. (2019). *Diseño e implementación de un sistema de extrusión de filamento*. Universidad Autónoma de Occidente. <https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/11024/T08590.pdf>
- Jin, M., Neuber, C. & Schmidt, H. W. (2020). Tailoring polypropylene for extrusion-based additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 33(101101). <https://doi.org/doi:10.1016/j.addma.2020.101101>
- Kristiawan, R. B., Imaduddin, F., Ariawan, D., Ubaidillah, B. & Arifin, Z. (2021). A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters. *Open Engineering*, 11(1), 639-649. <https://doi.org/doi:10.1515/eng-2021-0063>
- Kuo, C. C., Liu, L. C., Teng, W. F., Chang, H. Y., Chien, F. M., Liao, S. J. & Chen, C. M. (2016). Preparation of starch/acrylonitrile-butadiene-styrene copolymers (ABS) biomass alloys and their feasible evaluation for 3D printing applications. *Composites Part B, Engineering*, 86, 36-39. <https://doi.org/doi:10.1016/j.compositesb.2015.10.005>
- Liu, Z., Wang, Y., Wu, B., Cui, C., Guo, Y. & Yan, C. (2019). A critical review of fused deposition modeling 3D printing technology in manufacturing polylactic acid parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102(9-12), 2877-2889. <https://doi.org/doi:10.1007/s00170-019-03332-x>
- Mani, M., Lyons, K. W. & Gupta, S. K. (2014). Sustainability characterization for additive manufacturing. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 119, 419. <https://doi.org/doi:10.6028/jres.119.016>
- Martínez, S. (2022). *Todo lo que debes saber sobre la ley que prohíbe los plásticos de un solo uso en Colombia*. Goula. <https://goula.lat/todo-lo-que-debes-saber-sobre-la-ley-que-prohibe-los-plasticos-de-un-solo-uso-en-colombia/>
- Moradi, M., Beygi, R., Yusof, N., Amiri, A., da Silva, L. F. & Sharif, S. (2023). 3D printing of acrylonitrile butadiene styrene by fused deposition modeling: Artificial neural network and response surface method analyses. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 32(4), 2016-2028. <https://doi.org/doi:10.1007/s11665-022-07250-0>
- Morales, M. A., Maranon, A., Hernández, C., Michaud, V. & Porras, A. (2023). Colombian sustainability perspective on fused deposition modeling technology: Opportunity to develop recycled and biobased 3D printing filaments. *Polymers*, 15(3), 528. <https://doi.org/doi:10.3390/polym15030528>
- Naciones Unidas. (2023). *Día mundial del medio ambiente*. <https://www.un.org/es/observances/environment-day>

Oliveira, R., Silva, M. H., Agrawal, P., Brito, G., Cunha, C. T. & Mélo, T. J. (2023). *Recycling of acrylonitrile butadiene styrene from electronic waste for the production of Eco-friendly filaments for 3D printing*. 3D Printing and Additive Manufacturing. <https://doi.org/doi:10.1089/3dp.2022.0211>

Ramos Espinosa, G. y Lombana Gómez, G.(2019). *Diseño e implementación de un sistema de extrusión de filamento para impresión 3D a partir de botellas recicladas*. Universidad Autónoma de Occidente. <https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/11024/T08590.pdf>

Turku, I., Kasala, S. & Kärki, T. (2018). Characterization of polystyrene wastes as potential extruded feedstock filament for 3D printing. *Recycling*, 3(4), 57. <https://doi.org/doi:10.3390/recycling3040057>

Vidakis, N., Petousis, M., Tzounis, L., Maniadi, A., Velidakis, E., Mountakis, N. & Mechtcherine, V. (2020). Sustainable additive manufacturing: Mechanical response of Polypropylene over multiple recycling processes. *Sustainability*, 13(1), 159. <https://doi.org/doi:10.3390/su13010159>