

## MECHANICAL CHARACTERIZATION OF ADDITIVE MANUFACTURED POLYMER COMPONENTS USING VIRGIN AND RECYCLED FILAMENTS.

C. Alonso, M. Lorenzo<sup>1\*</sup>, W.M.H. Verbeeten<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Electromecánica (Universidad de Burgos)

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Civil (Universidad de Burgos)

Escuela Politécnica Superior, Avda. Cantabria, 09006, Burgos

\* Persona de contacto: [mlbanuelos@ubu.es](mailto:mlbanuelos@ubu.es)

### RESUMEN

La finalidad del presente estudio es iniciar la investigación relacionada con la influencia del proceso de reciclado sobre las propiedades mecánicas de componentes poliméricos producidos mediante la tecnología de fabricación aditiva. Se han fabricado filamentos a partir de polímero reciclado, que posteriormente se han convertido en componentes para su caracterización mecánica. Se ha conseguido fabricar filamento reciclado de gran calidad en comparación al filamento comercial, mediante un proceso de extrusión. Se han comparado las propiedades mecánicas de probetas fabricadas con (i) filamento comercial, (ii) filamento producido a partir de granza comercial y (iii) filamento producido a partir de material reciclado de componentes previamente impresos. El material empleado ha sido el polímero biodegradable ácido poliláctido (PLA), adquirido en forma de filamento y granza comerciales de un único proveedor. No se han apreciado pérdidas significantes de propiedades mecánicas tras utilizar filamento de material reciclado.

**PALABRAS CLAVE:** Fabricación Aditiva, filamento comercial, filamento reciclado, polímero biodegradable, propiedades mecánicas.

### ABSTRACT

The objective of the present study is initiating research related to the influence of a recycling process on the mechanical properties of polymer components produced using the additive manufacturing technology. 3D printer filaments were manufactured using recycled material, and subsequently converted in components for mechanical characterization. Printer filaments were produced with a quality comparable to commercial filaments, using an extrusion process. A comparison was made between mechanical properties of tensile specimen produced with (i) commercial printer filament, (ii) printer filament produced from commercial pellets, and (iii) printer filament made of recycled material coming from previously 3D printed components. The material used was the biodegradable polymer PolyLactid Acid (PLA), acquired in commercial filament and pellet form from the same provider. No significant loss of mechanical properties was detected when using filaments produced from recycled material.

**KEYWORDS:** Additive Manufacturing, commercial filament, recycled filament, biodegradable polymer, mechanical properties.

## 1. INTRODUCCIÓN

Recientemente las técnicas de fabricación aditiva [1] están teniendo grandes avances, y su aplicación para obtener componentes con geometrías complejas es muy diversa en sectores como el industrial, aeroespacial, automoción y la medicina, entre otros [2,3]. En este sentido, están cobrando más protagonismo no sólo como técnicas de prototipado rápido, sino como técnicas para desarrollo de componentes finales [4]. La fabricación aditiva conocida como FFF “*fused filament fabrication*” [5] o impresión 3D es una de estas técnicas que consiste en que, a partir de un filamento o hilo de

un determinado polímero, mediante su fundición, se crea una geometría capa por capa [6,7].

En general, los polímeros presentan muchas ventajas y aplicaciones, pero además son cada vez más una problemática para el medio ambiente, debido a su bajo índice de biodegradabilidad y su negativo impacto ambiental. Por ello, es importante que no sean desechados y se busquen medidas para su correcto reciclaje y reutilización. En el caso de la impresión 3D resulta sencillo obtener piezas, si se compara con otras técnicas de fabricación, y reciclarlas para volver a usarlas en la impresión de nuevas geometrías.

Cuando se diseña y fabrica un componente, es importante tener conocimiento de la durabilidad del mismo, si este está sometido a algún tipo de esfuerzos en su vida útil. De hecho, existen algunos los estudios entorno las propiedades mecánicas de componentes obtenidos por impresión 3D [8,9,10], pero son muy pocos los que hay sobre los componentes obtenidos con material reciclado del mismo [11,12].

El objeto de este estudio es ver cómo afecta, a las propiedades mecánicas de las geometrías obtenidas mediante FFF, el uso de filamento reciclado. Para ello se han comparado, mediante resultados experimentales, las propiedades mecánicas obtenidas del ensayo de tracción en probetas fabricadas mediante FFF con filamentos obtenidos de diferentes maneras: Sin reciclar o virgen y reciclado. Para ello el material empleado ha sido PLA natural.

## 2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 2.1. Material

El material empleado para este estudio ha sido PLA Ácido Poliláctico [13,14], un polímero biodegradable [15,16] muy utilizado en la impresión 3D. Para este estudio se ha utilizado PLA de color natural en tres formas: Por un lado, filamento comercial de PLA y con un diámetro de 1,75 milímetros, correspondiendo al diámetro con el que trabaja la impresora empleada, por otro lado, granza (pellets), y finalmente material reciclado (Figura 1).

Tanto el filamento comercial de PLA como la granza, son de la marca Smartfil [17].



Figura 1. Filamento reciclado, granza y polímero reciclado.

### 2.2. Metodología

Para la consecución de los objetivos descritos en el apartado anterior, se han comparado las propiedades mecánicas mediante probetas sólidas (Figura 2) de espesor 3mm, fabricadas con distintos tipos de filamentos. En primer lugar, se ha utilizado el filamento comercial, preparado para ser usado directamente en impresión 3D, en segundo lugar, se ha elaborado filamento mediante una máquina extrusora. En este segundo caso, se han fabricado dos tipos de filamento: Uno, a partir de granza (pellets), y otro, a partir de trozos de polímero triturado, proveniente de piezas que han sido previamente impresas y desechadas de PLA (reciclado). El material reciclado, antes de ser empleado para fabricar filamento, ha pasado por una trituradora.

Por lo tanto, se han obtenido mediante impresión 3D probetas a ensayar de tres tipos de filamento: comercial, de granza y reciclado.

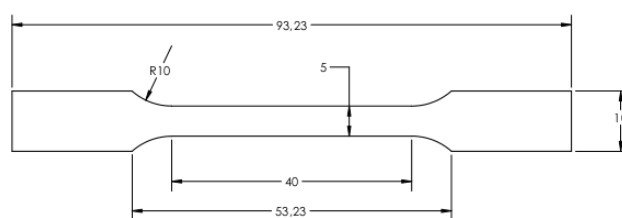


Figura 2. Dimensiones de la probeta en mm. Espesor de probeta de 3 mm.

En la Figura 3 se puede ver el esquema metodológico empleado en el programa experimental. En los tres cuadros superiores sombreados, se pueden ver los tres filamentos usados: comercial, a partir de granza y a partir de piezas recicladas. Tanto la granza como el polímero triturado, han pasado una la extrusora para convertirse en filamento antes de ser usados en la impresora 3D para fabricar las probetas.

De cada tipo de filamento, se ha obtenido un lote de quince probetas. Antes de realizar los ensayos de tracción, todas las probetas han sido medidas y pesadas una a una para obtener su masa, volumen y densidad aparente. Posteriormente a esto, cada tres de estas 15 probetas, han sido ensayadas a una velocidad de deformación diferente, siendo un total de 5 velocidades por cada lote. Con esto se pretende analizar la influencia en los resultados del empleo de distintas velocidades de ensayo.

Los parámetros de impresión empleados para la obtención de las probetas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros de impresión.

Velocidad de impresión	30 mm/s
Temperatura de impresión	200°C
Densidad de relleno	100 %
Orientación de filamento fundido	0°
Altura de capa	0,1mm

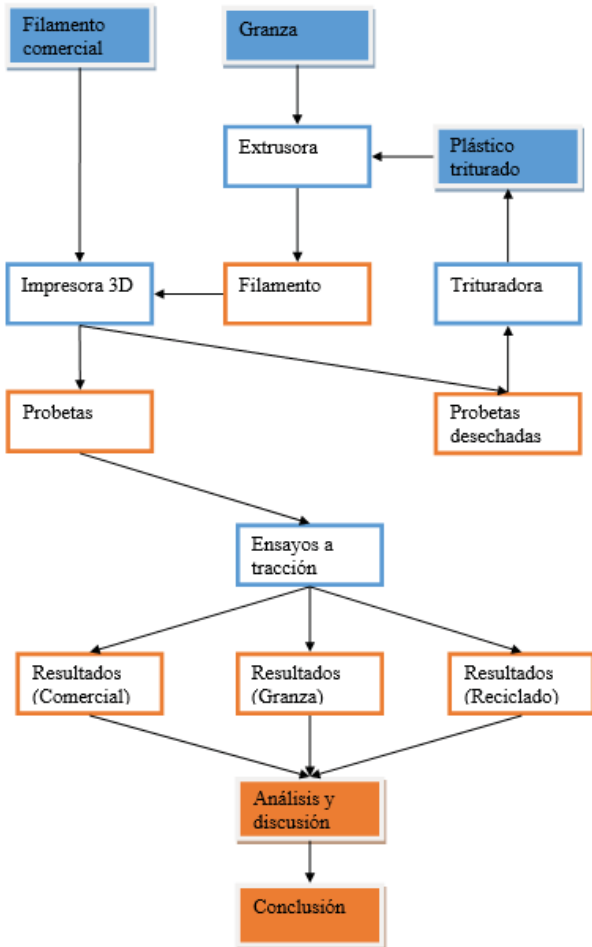


Figura 3. Esquema metodológico experimental.

### 2.3. Equipos experimentales

Para la fabricación de las probetas mediante filamento fundido de PLA, se ha empleado una impresora 3D modelo Prusa i3 Steel [18].

El proceso de extrusión [19] para la obtención de filamento se ha realizado mediante una máquina extrusora modelo Filabot EX2 [20], junto con otras dos máquinas: Filabot Airpath [21], que mediante unos ventiladores se ha encargado de enfriar el filamento que salía fundido de la extrusora, y Filabot Spooler [22], encargada de bobinar el filamento ordenado para su posterior uso en la impresora 3D.

En la Figura 4 se muestra un esquema de la disposición de trabajo de los equipos de extrusión, enfriado y bobinado de filamento obtenido de granza y de material reciclado.

Para realizar los ensayos de tracción se ha empleado la máquina universal de ensayos o MTS Criterion modelo 43 de 10 kN.



Figura 4. Filabot EX2, Filabot Airpath y Filabot Spooler, durante el proceso de extrusión, enfriado y bobinado de filamento.

## 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 3.1. Densidad aparente

Como se ha comentado, una vez obtenidas mediante impresión 3D las probetas, antes de ser ensayadas, se han realizado una serie de mediciones para los tres tipos de probetas en función del origen del filamento con el que se han fabricado. Los resultados obtenidos en estas mediciones de masa, volumen y densidad aparente, se recogen en la Tabla 2.

Tabla 2. Promedio y desviación de la medición en probetas de masa, volumen y densidad, en función de cada uno de los tres tipos de filamento.

Filamento	Comercial	Granza	Reciclado
Masa (g)	2,640 ±0,029	2,802±0,062	2,594±0.048
Volumen (mm <sup>3</sup> )	2226,56±18,26	2393,48±69,28	2195,51±35,11
Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,185±0,007	1,170±0,009	1,181±0,013

Se puede apreciar que las probetas obtenidas mediante filamento proveniente de granza han presentado una mayor masa, al igual que un mayor volumen, si lo comparamos con el resto. Por otro lado, se observa que hay una mayor dispersión de las probetas obtenidas mediante filamento proveniente de granza y las obtenidas de PLA reciclado, respecto de las comerciales, siendo mayor la dispersión en las de granza.

Estas diferencias se asocian fundamentalmente a la calidad obtenida en el diámetro del filamento empleado para fabricar probetas, siendo el comercial el de mayor calidad ( $1,75 \pm 0,03 \text{ mm}$ ), frente al fabricado por extrusión ( $1,75 \pm 0,05 \text{ mm}$ ).

Por otra parte, se aprecia que el filamento obtenido de granza, presenta una medida en su diámetro algo mayor al requerido, siendo aproximadamente de  $1,8 \text{ mm}$ . Por esto, al introducir en la impresora 3D un filamento de mayor diámetro para fabricar las probetas, terminó

reflejándose en una mayor cantidad de material obtenido en las geometrías impresas. En referencia a la densidad aparente de las probetas impresas obtenidas mediante los tres tipos de filamento, se pueden considerar prácticamente similares.

Tanto el filamento obtenido de granza, como el reciclado, han seguido el mismo proceso para su fabricación y se ha realizado en los mismos equipos. Sin embargo, se aprecian unas medidas más similares entre las probetas recicladas y las comerciales. Esto se asocia a que en la fabricación del filamento reciclado se obtuvo una media en su diámetro muy próxima a 1,75 mm. Respecto al acabado superficial observado de los filamentos obtenidos para la impresión de las probetas, si se ordenan comenzando por el mejor acabado, el orden ha sido: 1º el comercial, 2º el reciclado y 3º el de granza.

**3.2. Resultados experimentales tracción.**

En las Figuras 5, 6 y 7 se muestran las curvas representativas de los ensayos de tracción (tensión-deformación) realizados a temperatura ambiente, para cada una de las 5 velocidades de deformación, y para cada uno de los 3 tipos de filamentos con los que se han fabricado las probetas.

Por su parte, en las Figuras 8, 9 y 10 se muestran en conjunto todos los resultados obtenidos de los ensayos de tracción, para cada uno de los tres tipos de filamento. Se muestran los valores obtenidos de tensión de fluencia frente a cada una de las velocidades de deformación. En cada una de estas tres figuras, se muestra, el ajuste realizado para cada uno de los modelos (con y sin corrección de la densidad). Se aprecia que el nivel de tensión de fluencia es superior, para las cinco velocidades de deformación, en el caso del ajuste obtenido con valores corregidos mediante la densidad.

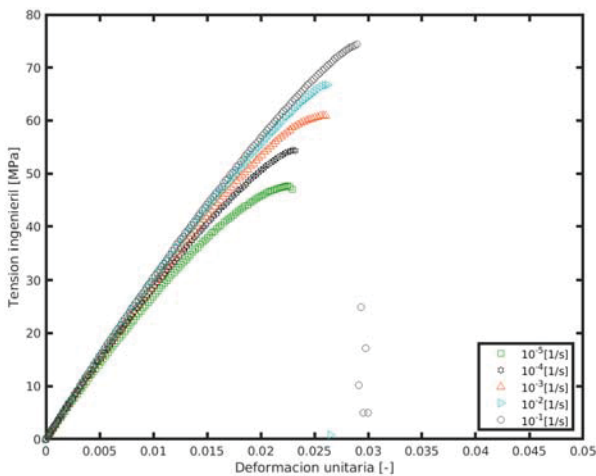


Figura 5. Curvas tensión-deformación, para cada velocidad de deformación, de los ensayos realizados con probetas impresas con filamento de PLA comercial.

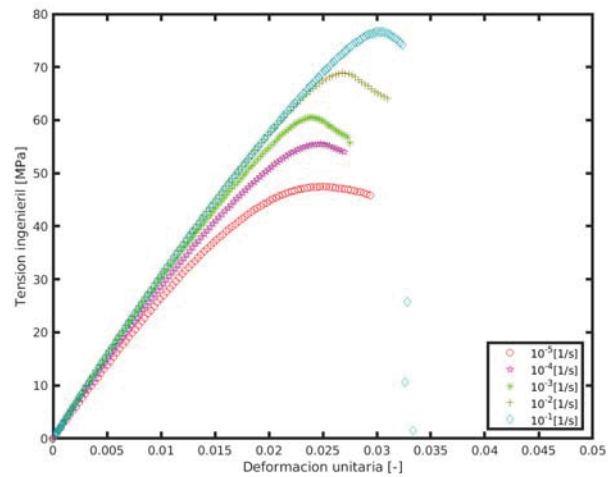


Figura 6. Curvas tensión-deformación para cada velocidad de deformación, en los ensayos realizados con probetas impresas con filamento de PLA de granza.

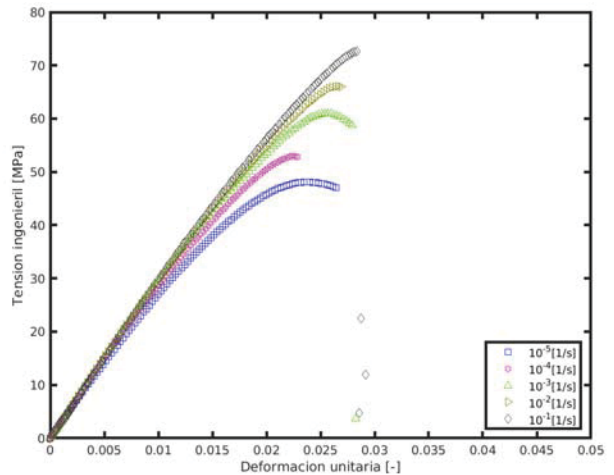


Figura 7. Curvas tensión-deformación para cada velocidad de deformación, en los ensayos realizados con probetas impresas con filamento de PLA reciclado.

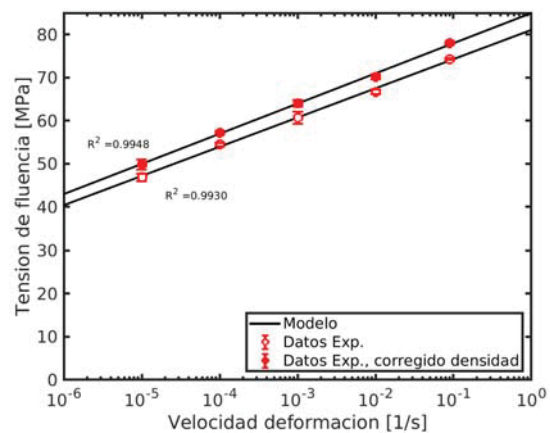


Figura 8. Resultados tensión de fluencia-velocidad de deformación, y ajustes con y sin corrección por la densidad para probetas de filamento comercial.



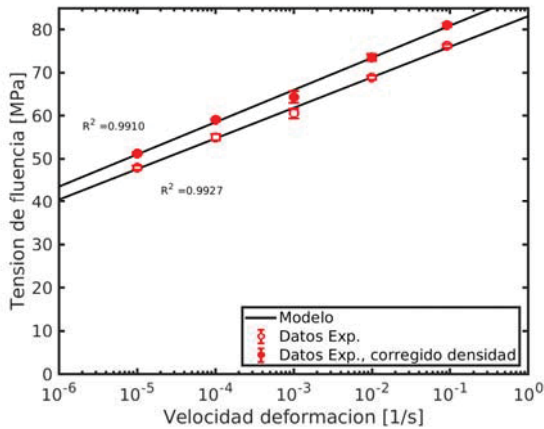


Figura 9. Resultados tensión de fluencia-velocidad de deformación, y ajustes con y sin corrección por la densidad para probetas de filamento de granza.

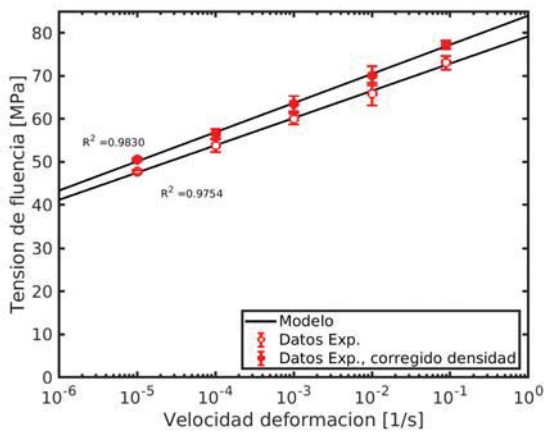


Figura 10. Resultados tensión de fluencia-velocidad de deformación, y ajustes con y sin corrección por la densidad para probetas de filamento reciclado.

En el caso de este polímero (PLA), la tensión de fluencia coincide con la tensión máxima que es capaz de alcanzar en el ensayo de tracción. De forma general se observa que a medida que aumenta la velocidad de deformación del ensayo de tracción, aumenta la tensión de fluencia. En la *Tabla 3* que se muestran las tensiones de fluencia obtenidas en función de las velocidades de deformación, para los ensayos realizados con probetas obtenidas mediante cada tipo de filamento.

Tabla 3. Promedio y desviación de la tensión de fluencia para cada velocidad y cada tipo de probeta.

Velocidad (1/s)	Tensión de fluencia (MPa)		
	Comercial	Granza	Reciclado
$10^{-5}$	46,91 ± 0,89	47,96 ± 0,47	47,71 ± 0,42
$10^{-4}$	54,52 ± 0,43	55,05 ± 0,75	53,86 ± 1,58
$10^{-3}$	60,74 ± 1,35	60,57 ± 1,10	60,04 ± 1,28
$10^{-2}$	66,76 ± 0,53	68,94 ± 0,48	65,87 ± 2,62
$10^{-1}$	74,35 ± 0,19	76,25 ± 0,44	73,08 ± 1,61

Representando los valores de la *Tabla 3*, corregidos por densidad aparente, se ha obtenido la *Figura 11* para los

tres tipos de probetas en función del tipo de filamento con el que se han fabricado.

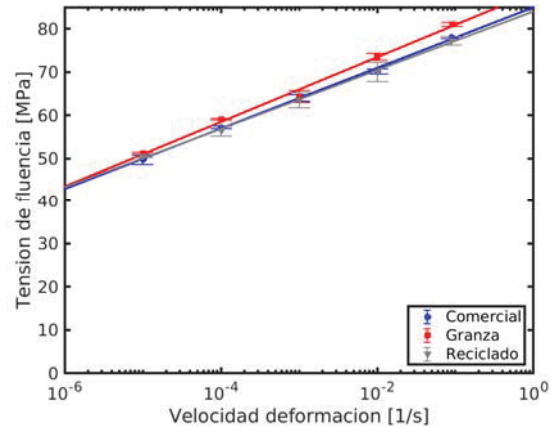


Figura 11. Tensión de fluencia para las 5 velocidades de deformación y para cada tipo de probeta.

De los resultados obtenidos y representados en las *Figuras 5, 6 y 7*, se observa que las probetas obtenidas a partir de filamento obtenido de granza y las obtenidas con filamento reciclado, han resultado algo más dúctiles que las fabricadas con filamento comercial. Estos resultados aún están bajo investigación.

Relacionado con esto, se sabe que el PLA es un polímero que puede ser 100% amorfo o puede ser semi-cristalino con un bajo % de cristalinidad. Si el PLA puede formar cristales es debido a la estereoregularidad de la cadena polimérica [23]. El % de cristalinidad que puede presentar el PLA va en función del proceso de fabricación [24], puesto que la cristalización es un proceso cinético relacionado con la temperatura en función del tiempo que sufre el material al ser procesado. Se sospecha que la parte cristalina provoca que el material se comporta más dúctil, aunque, como indicado anteriormente, aún está bajo investigación. Por lo tanto, las pequeñas variaciones de temperatura durante el proceso de extrusión e impresión, pueden tener influencia en los resultados de los ensayos. En la *Figura 11*, de la recta que hace referencia a las tensiones de fluencia alcanzadas por probetas obtenidas con filamento de granza, se puede apreciar que han sido mayores que las obtenidas con filamento comercial. Esto podría deberse a que, al ser más voluminosas, finalmente han tenido una mejor fusión entre filamentos depositados, y por lo tanto han sido más resistentes a tracción. No obstante, los valores obtenidos en probetas impresas por ambos tipos de filamento, han sido muy similares.

Por otra parte, en la *Figura 11* se observa, en el caso de las probetas obtenidas con filamento reciclado, que tienen prácticamente el mismo comportamiento mecánico que las probetas obtenidas con filamento comercial. Con lo cual puede apreciarse que, para un único proceso de reciclado, las geometrías obtenidas con el filamento reciclado no pierden propiedades.

### 3. CONCLUSIÓN

En conclusión, el filamento comercial ha presentado un acabado mejor en las piezas impresas. Esto depende de la calidad del filamento. En cuanto a filamentos fabricados mediante el sistema Filabot, hay métodos que podrían ayudar a mejorar la calidad, como puede ser el uso de un sistema de calibración del filamento. Daría una medida media más cercana a la requerida, y unas tolerancias menores de esta misma.

En general y en cuanto a las propiedades mecánicas, no ha habido diferencias significativas entre ninguna de los tres tipos de probetas (filamento comercial, de granza y de reciclado). Prácticamente, el filamento de PLA reciclado apenas ha sufrido un proceso de reciclaje, siendo interesante, como trabajo futuro, estudiar cómo afecta a las propiedades mecánicas del material cada ciclo de reciclaje.

En lo referente a la rentabilidad económica a la hora de seleccionar un filamento u otro se sabe que, el filamento comercial es más caro que la granza. En el caso del filamento reciclado, la materia prima es muy barata y fácil de conseguir. Sin embargo, el filamento extruido, tanto de granza y de reciclado, requieren de un proceso de extrusión. Además, en el caso del material reciclado, requiere también un proceso de trituración.

En resumen, las diferencias entre estos tres tipos de filamento son pocas. Para la fabricación de geometrías con medidas muy exactas, será mejor el uso de un filamento comercial o conseguir mejorar la calidad del filamento fabricado. Si lo que importan son las propiedades mecánicas, se pueden abaratar costes fabricando filamento e incluso reciclando material.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer la financiación recibida de la Consejería de Educación de la Junta de Castilla y León al amparo de las ayudas destinadas al apoyo de los grupos de investigación reconocidos de universidades públicas de Castilla y León a iniciado en el 2018, Proyecto: BU033G18.

### REFERENCIAS

[1] I. Gibson, D.W. Rosen, B. Stucker, "Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing." Springer-Verlag, Boston (MA), 2010. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1120-9>

[2] C.K. Chua, K.F. Leong, "3D Printing and Additive Manufacturing: Principles and Applications" 4th Edition, World Scientific Publishing, London, 2014. <https://doi.org/10.1142/9008>

[3] M. Sugavaneswaran, G. Arumaikkannu, "Modelling for randomly oriented multi material additive manufacturing component and its fabrication." *Materials & Design*, 54, 2014, pp. 779-785. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.08.102>

[4] S. Mellor, L. Hao, D. Zhang, "Additive manufacturing: A framework for implementation." *Int. J. Product. Econ.*, 149, 2014, pp. 194-201. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.07.008>

[5] R. Bogue, "3D printing: the dawn of a new era in manufacturing?" *Assem. Autom.*, 33, 2010, pp. 307-311. <https://doi.org/10.1108/AA-06-2013-055>

[6] S. Upercraft, R. Fletcher, "The rapid prototyping technologies, *Assembly Automation*", Vol 23 Issue: 4, pp.318-330, 2003. <https://doi.org/10.1108/01445150310698634>

[7] B.M. Tymrak, M. Kreiger, J.M. Pearce, "Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions." *Materials and Design*, 58: 242-246, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.038>

[8] P.J. Arribas, W.M.H. Verbeeten, M. Lorenzo, "Effects of infill orientation and printing speed on tensile properties of PLA specimens fabricated with an open-source 3D printer." *Anales de Mecánica de la Fractura* 34, pp.355, 2017.

[9] J. M. Chacón, M. A. Caminero, E. García-Plaza, P. J. Núñez, "Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling." *Materials & Design*, Volume 124, 15 June, 2017, Pages 143-157. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.065>

[10] M. Sugavaneswaran, G. Arumaikkannu, "Analytical and experimental investigation on elastic modulus or reinforced additive manufactured structure." *Materials & Design*, 66 (2015) 29–36.

[11] Arteaga Medina, Laura.: "Fabricación y caracterización de filamentos para impresora 3D a partir de materiales reciclados", Universidad de la Laguna, Santa Cruz de Tenerife, 2015.

[12] Del Medico Bravo, Alejandro Javier.: "Propiedades mecánicas de componentes fabricados mediante modelado por deposición fundida", Universidad de La Laguna, Santa Cruz de Tenerife, 2017.

[13] I. Navarro-Baena, V. Sessini, F. Dominici, L. Torre, J.M. Kenny, L. Peponi, "Design of biodegradable blends based on PLA and PCL: from morphological, thermal and mechanical studies to shape memory behavior." *Polym. Degrad. Stabil.*, 132, 2016, pp. 97-108.

[14] F. Iniguez-Franco, R. Auras, G. Burgess, D. Holmes, X.Y. Fang, M. Rubino, H. Soto-Valdez, "Concurrent solvent induced crystallization and hydrolytic degradation of PLA by water-ethanol solutions." *Polymer*, 99, 2016, pp. 315-323.

[15] J. Coreño-Alonso, M.T. Méndez-Bautista, "Relación estructura-propiedades de polímeros" *Educación Química*, Volume 21, Issue 4, October 2010, Pages 291-299.

[16] S.H. Hsu, K.C. Hung, C.W. Chen "Biodegradable polymer scaffolds" *J. Mater Chem. B*, 4 (47) 2016, pp. 7493-7505. <https://smartmaterials3d.com/es/>

[17] Prusa3D - Impresora 3D de Josef Prusa. <https://www.prusa3d.es/>

[18] Mikell P. Groover, "Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas", Pearson Educación, pp.313-323, 1997.

[19] Filabot EX2 Filament Extruder. <https://www.filabot.com/collections/filabot-core/products/filabot-original-ex2>

[20] Filabot Airpath. <https://www.filabot.com/collections/filabot-core/products/filabot-airpath>

[21] Filabot Spooler. <https://www.filabot.com/collections/filabot-core/products/filabot-spooler>

[22] T.A.P. Engels, S.H.M. Söntjens, T.H. Smit, L.E. Govaert, "Time-dependent failure of amorphous poly lactides in static loading conditions." *J. Mater. Sci: Mater. Med.*, 21, 2010, pp. 89-97. <https://doi.org/10.1007/s10856-009-3851-9>

[23] B.A.G. Schrauwen, R.P.M. Janssen, L.E. Govaert, H.E.H. Meijer, "Intrinsic Deformation Behavior of Semicrystalline Polymers." *Macromolecules*, 37, 2004, pp. 6069-6078. <http://doi.org/10.1021/ma035279t>