

Breve revisión sobre las variables de impresión 3D en Ácido Poliláctico y su influencia en el comportamiento tribológico.

Cancelare, Selene¹; Zanin, Maximiliano^{1,2}; Urbano Pintos, Nicolás^{1,2}.

¹ Lab. de Ensayos de Desgaste y Fricción Sólida (LEDFS) – UTN, Fac. Regional Haedo, Argentina.

² DEILAP – CITEDEF Dep. de Inv. en Láseres y sus aplicaciones, Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa – Villa Martelli, Argentina.

Palabras clave: Desgaste, fricción, FDM, PLA, patrón de relleno

Objetivo

El presente trabajo tiene como objetivo recopilar datos referidos a los efectos de las variables de manufactura aditiva polimérica (textura, patrones de relleno, densidad, color, entre otras) en el comportamiento tribológico y mecánico. Esta búsqueda recopilatoria se presenta como un estado del arte en el marco de la investigación bibliográfica referida principalmente al comportamiento tribológico de estructuras de Ácido Poliláctico (PLA, Polylactic Acid) obtenidas a partir técnicas de modelado por deposición fundida de impresión 3D (Proyecto PID MAUTNHA0007821 – Res. CS UTN N° 221/19). Además, esta recopilación comprende una monografía final de la asignatura Introducción al Desgaste Mecánico dictada en la UTN FRH, por el Grupo de Investigación Facultad Laboratorio de Ensayos de Desgaste y Fricción sólida LEDFS.

Introducción

En la última década, la técnica de modelado por deposición fundida o FDM (Fused Deposition Modeling) ha experimentado un notable aumento en su utilización, gracias a su facilidad de procesamiento, bajo costo y capacidad para fabricar piezas con formas y geometrías complejas.

La tecnología de la impresión 3D o fabricación aditiva polimérica es utilizada para producir estructuras impresas para una variedad de aplicaciones en distintas ramas de las ingenierías [1]. La fabricación aditiva es un proceso mediante el cual el material se va depositando por capas de manera controlada y así obtener un objeto tridimensional [2]. Existen varios métodos de fabricación aditiva, no obstante, el método de discusión es el modelado por deposición fundida donde el material "fundido" es depositado en capas, de abajo hacia arriba, a través de una boquilla fija que se encuentra a una mayor temperatura de fusión que el material, solidificándose inmediatamente después de salir de ella [3]. Existen variadas investigaciones que concluyen que las propiedades mecánicas y tribológicas del material se encuentran influenciadas por las características de impresión como la temperatura, presión, rugosidad, velocidad, arquitectura/patrón de relleno, densidad de relleno e incluso el color del material [4 - 8].

La temperatura influye directamente sobre la deposición y cohesión de los filamentos acumulados según la geometría. De manera conjunta el patrón de relleno o arquitectura, simultáneamente con la densidad de material depositado (densidad de relleno) afecta en la cantidad del material y zonas de fusión/soldadura plástica en la estructura modelada tridimensionalmente. Por otra parte, los pigmentos en los polímeros son agentes químicos que pueden afectar algunas de sus propiedades en las zonas de contacto deslizante, y a la química de la resistencia mecánica. Pandzic y colaboradores [9] estudiaron la influencia de los pigmentos en las propiedades mecánicas a la tracción del PLA. A partir de probetas de 14 distintos colores reportaron la influencia del color en la resistencia a la tracción, límite elástico y módulo de elasticidad [10]. Cabe aclarar que se establecieron los parámetros de impresión estándares como se indica en la Tabla 1.

TABLA 1 – características de los parámetros de impresión de la muestra 3D [9].

Parámetros de impresión 3d	Valor
Altura de capa	0.15 mm
Espesor de pared	0.7 mm
Densidad de relleno	100%
Velocidad de impresión	60 mm/s
Temperatura de impresión	200 °C
Temperatura de la cama caliente	60 °C

Teniendo en cuenta que las propiedades mecánicas son cruciales para las piezas funcionales, es relevante examinar influencia de los parámetros del proceso de impresión en el rendimiento mecánico [11 - 15]. El efecto de la orientación de construcción en relación con las propiedades mecánicas fue estudiado por Chacon y colaboradores, los cuales concluyeron que la orientación de construcción sea vertical, horizontal o plana y al borde, como se muestra en la Figura 1, influyen en las propiedades mecánicas determinadas por ensayos de flexión y de tracción [15]. Los espesores de capa utilizados en esta investigación fueron de 0,06 mm y 0,24 mm, y con velocidades de avance en la impresión de 20 mm/s a 80 mm/s.

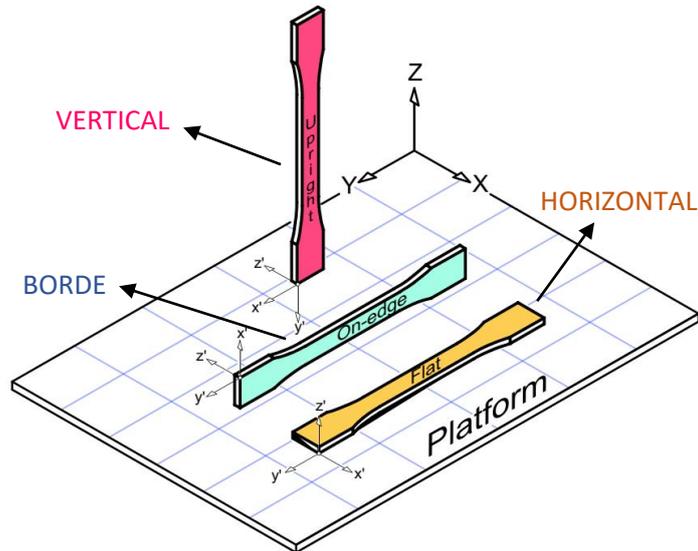


Figura 1.- Orientación de construcción (al borde, plana u horizontal, vertical) [16].

A partir de estas investigaciones se observa que los ensayos de flexión revelan mayor porcentaje de deformación plástica en las muestras construidas con orientación al borde respecto de las construidas con orientación vertical, como se indica en la Figura 2.

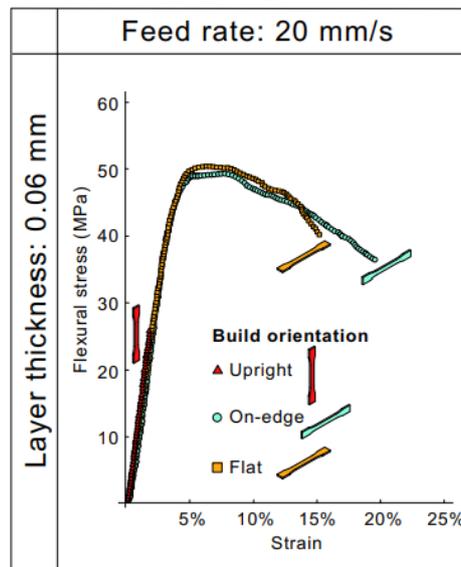


Figura 2.- Curvas de tensión-deformación promedio para los especímenes de flexión bajo diferentes condiciones de impresión [15].

Por otra parte, los ensayos de tracción de las muestras con orientación horizontal muestran mejor desempeño que las construidas al borde con bajos espesores de capa menores (0,06 mm). En cambio, con espesores de deposición mayores (0,24 mm) se invierten los comportamientos mecánicos mostrando mejoras en las muestras construidas al borde (Figura 3) [16]. Las orientaciones de borde

y plano mostraron los valores más altos para máxima resistencia a la tracción, flexión y rigidez, superando las propiedades de las muestras construidas con orientación vertical, que mostraron un comportamiento frágil y variación en el módulo de elasticidad [15]. Estas características afectan también a las propiedades tribológicas. Maries y colaboradores analizaron las propiedades en desgaste y fricción de estructuras obtenidas por FDM a partir de 8 distintos materiales para filamentos poliméricos ABS, GLASS, HIP, PCABS, PETG, ASA PRO, ESD y PLA PRO para evaluar condiciones antifriccionantes con bajo desgaste para calzado [16].

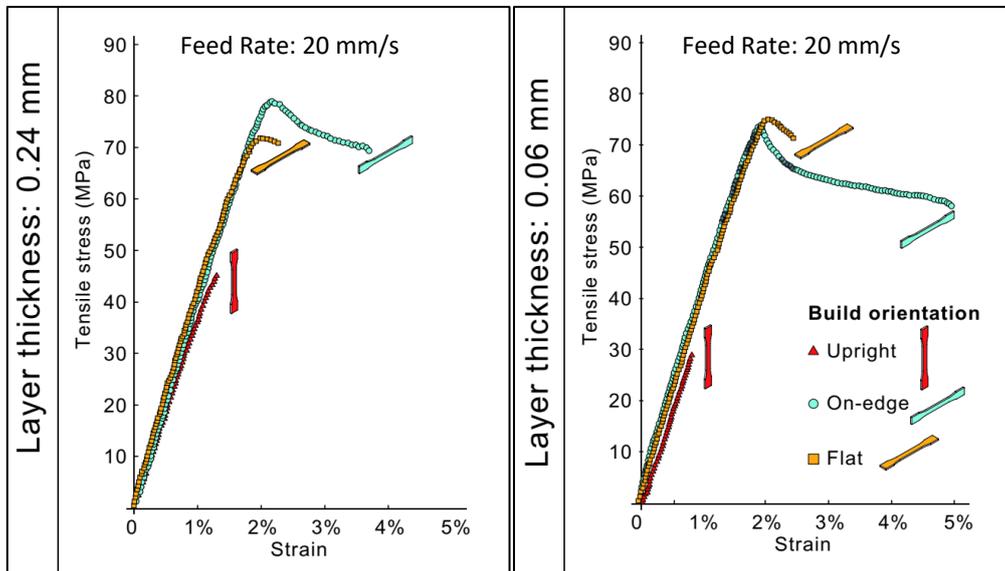


Figura 3.- Curvas de tensión-deformación promedio para las muestras de tracción en diferentes condiciones de impresión; Ensayos de tracción con espesor de capa 0,24mm (izq), con espesor de capa de 0,06 mm (der) [15].

Mohamed y colaboradores investigaron la influencia de parámetros en el proceso de fabricación aditiva FDM de piezas de PC-ABS en el desempeño tribológico en ensayos pin on disk [21]. El grosor de la capa, espacios de aire dependientes de la densidad de relleno, ángulo de trama y orientación afectan al CoF.

Propiedades tribológicas del patrón de relleno impreso por FDM con PLA

En términos de características tribológicas, las estructuras obtenidas por FDM con PLA ofrecen comportamientos dependientes de la temperatura, carga, arquitecturas, diseño, dimensiones, entre otras. El rendimiento tribológico es dependiente del texturizado de la superficie debido a que los micro depósitos pueden atrapar lubricantes y partículas de desgaste reduciendo el desgaste. Las texturas más comunes son las de microbandas o ranuras, aunque las técnicas FDM permiten fabricar texturas de microhoyuelos, como se muestra en la Figura 4 [17 - 20].

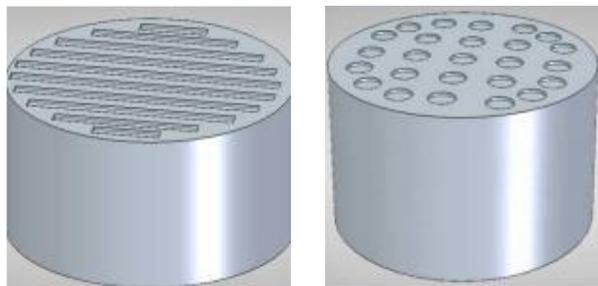


Figura 4.- Esquema de muestras con microsurcos con bandas o ranuras (izq.) y micro hoyuelos (der.).

Las técnicas FDM permiten infinidad de arquitecturas o patrones de relleno, dependientes del diámetro de filamento, técnicas de deposición y densidad de relleno. Renganathan [22] y

colaboradores investigaron las características tribológicas en ensayos pin on disk para tres tipos de patrones de relleno distintos; patrón concéntrico, patrón lineal y patrón de Hilbert (Figura 5) [22]. Estos patrones fueron ensayados para dos velocidades de impresión de 20 mm/s y 50 mm/s.

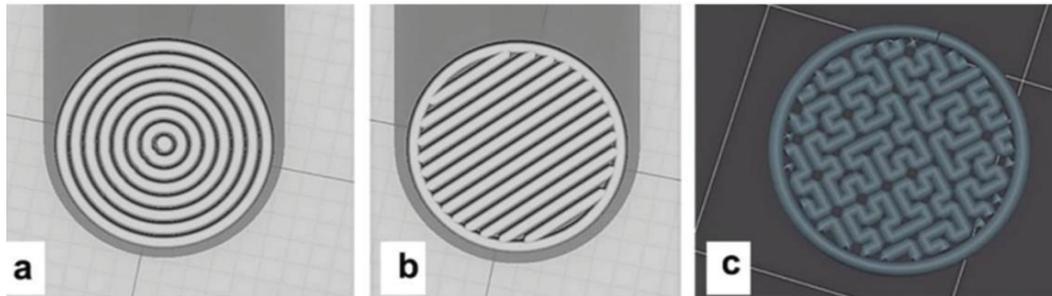


Figura 5.- Probetas con distinto Patrones de relleno, a) Concéntrico, b) Lineal, c) Patrón curvas de Hilbert [22]

Los ensayos realizados en un tribómetro pin on disk con cargas de 10N, velocidad de deslizamiento de 0,5 m/s y duración de 1800 segundos revelaron coeficientes de fricción estables para los pines construidos con patrones lineales con velocidad de impresión de 20mm/s, mientras que los impresos a 50mm/s revelan el comportamiento de fricción más estable con patrones concéntricos. Para las velocidades de impresión de 20 mm/s el patrón de curvas de Hilbert muestran el CoF (coeficiente de fricción) más bajo. El patrón de Hilbert en comparación con los otros dos patrones tiene la ruta de deposición más corta, es decir, al momento de imprimir la muestra su patrón de relleno experimenta una menor caída de temperatura debido a la menor distancia de recorrido de la boquilla, y logrando así mayor cohesión en la solidificación [22].

El color y sus combinaciones influyen sobre las propiedades mecánicas y también tribológicas. Ando y colaboradores [23] evaluaron el comportamiento tribológico en ensayos pin on disk con probetas cilíndricas combinadas entre dos polímeros PLA (color plata y blanco) con muestras homogéneas del mismo material con 100% relleno de color plata, y 100% de relleno de color blanco. Las combinaciones con distintos porcentajes de relleno son detalladas y esquematizadas en la figura 6 [23].

Muestra abreviatura	Patron	PLA blanco (%)	PLA plata(%)
S	Unico	0	100
W		100	0
D25	Puntos	25	75
D37		37	63
D50		50	50
L25	Lineas	25	75
L50		50	50
L70		75	25

Figura 6.- Composición de muestras y esquema de los ensayos de Ando y colaboradores (adaptado de [23])

Los ensayos se realizaron en 10 corridas cada 180 segundos para evitar la degradación térmica y muestran solo una evidente variación del desgaste, mientras que la variación de temperatura y el coeficiente de fricción permanecen sin diferencias significativas (Figura 7) [23].

La probeta de PLA blanco (100% W) a diferencia que la probeta de PLA color plata (100% S), tuvieron mayores diferencias con respecto al desgaste. Un análisis superficial del desgaste de los pines muestra más resistencia al flujo plástico en los patrones de punto. Los autores concluyen que los patrones de puntos están más dispersos por toda la superficie del polímero, lo que dificulta la distorsión y la estructura de la muestra se vuelve más resistente al desgaste (Figura 8).

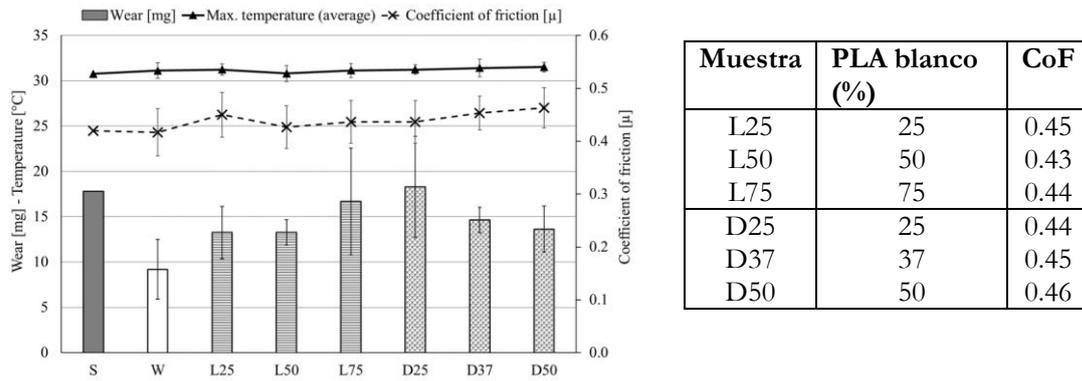


Figura 7.- Visualización gráfica de la variación de temperatura, CoF y desgaste según experimentado por [23].

Aziz y colaboradores [24] realizaron experimentaron en condiciones secas y lubricadas variando el tamaño de la arquitectura superficial en ensayos pin on disk, con cargas de 10, 20, 30, 40 y 50 N a velocidades de deslizamiento de 100 y 500 rpm durante 1500 segundos. El filamento ácido poliláctico blanco utilizado en este estudio es de 1,75 mm de diámetro, 1,2 g/cm³ de densidad. En la Figura 9 se muestran los tres tipos de arquitecturas utilizadas. Los experimentos en condiciones lubricadas se realizaron utilizando aceite SAE 20W40 [24].

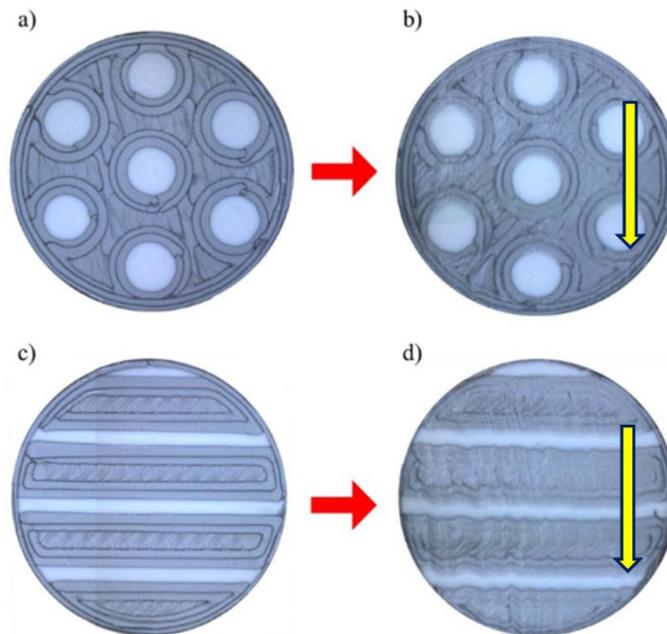


Figura 8.- Aspecto superficial antes y después del ensayo; muestras relleno a punto, a) antes, b) después del ensayo. Con relleno lineal; c) antes y d) después del ensayo pin on disk. (Adaptado de 23). La flecha sobre las muestras ensayadas indica la dirección de deslizamiento.

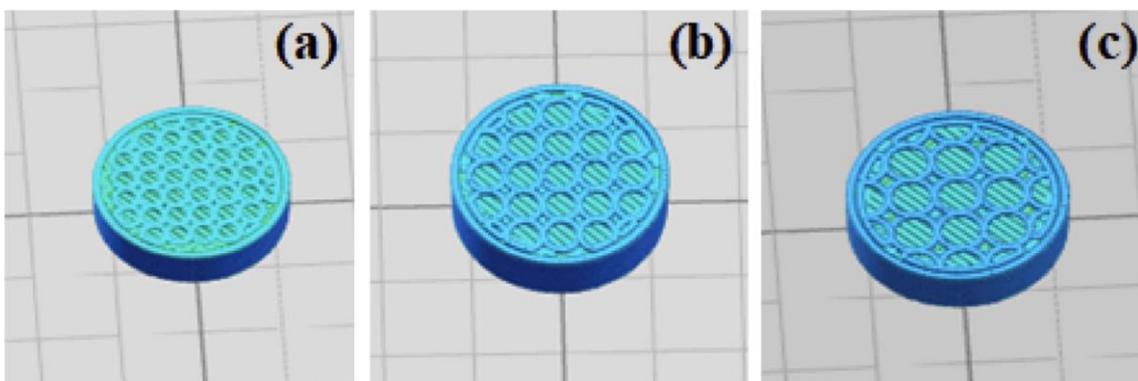


Figura 9. – Esquema de los patrones de relleno (a) T1, (b) T2, (c) T3 según [24].

En la Figura 10 se muestra la influencia de la carga en la variación del coeficiente de fricción promedio para ensayos a 100 rpm, mientras que la figura 12 muestra el equivalente realizado a 500rpm [24]. El patrón de relleno mas espaciado, con menor densidad de relleno, mantiene el CoF promedio indistintamente de la carga de ensayo, mientras que la de relleno intermedio (T2) muestra un incremento con la carga. Por le contrario en la Figura 11, se evidencia un incremento del CoF con el aumento de la carga en todas las arquitecturas. A alta velocidad, el coeficiente de fricción aumenta gradualmente con la carga, mostrando un aumento del 50% del CoF.

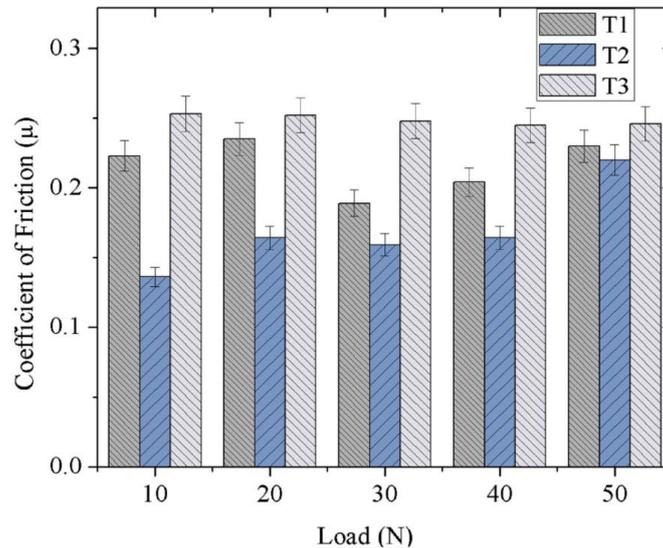


Figura 10.- CoF con las texturas (T1, T2 y T3) a diferentes cargas a 100 rpm sin lubricación [24].

En condiciones de deslizamiento seco, el coeficiente de fricción fue mínimo para la textura T2 (densidad de relleno intermedia) tanto a velocidades altas como bajas. Los autores sugieren que este comportamiento se debe a una capacidad menor de atrapar debris poliméricas y desprendimientos del film de transferencia. El análisis de la superficie realizado para condiciones secas reveló que el desgaste se debe principalmente a la adhesión y la abrasión. Esto concuerda con lo reportado con Ando y colaboradores [23]. La superficie lisa en caso de velocidades más bajas y altas indica menos daño debido a la adherencia con ausencia de surcos de abrasión. Existe una influencia del debilitamiento por temperatura por fricción que favorece a la formación efectiva de film de transferencia.

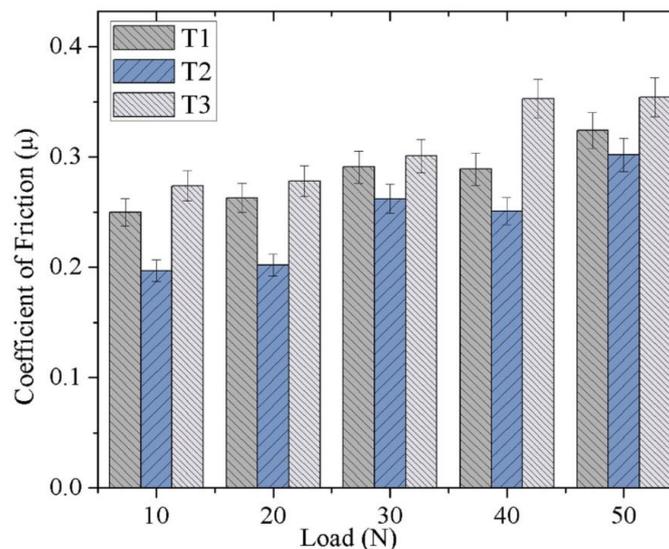


Figura 11.- CoF con las texturas (T1, T2 y T3) a diferentes cargas a 500 rpm sin lubricación [24].

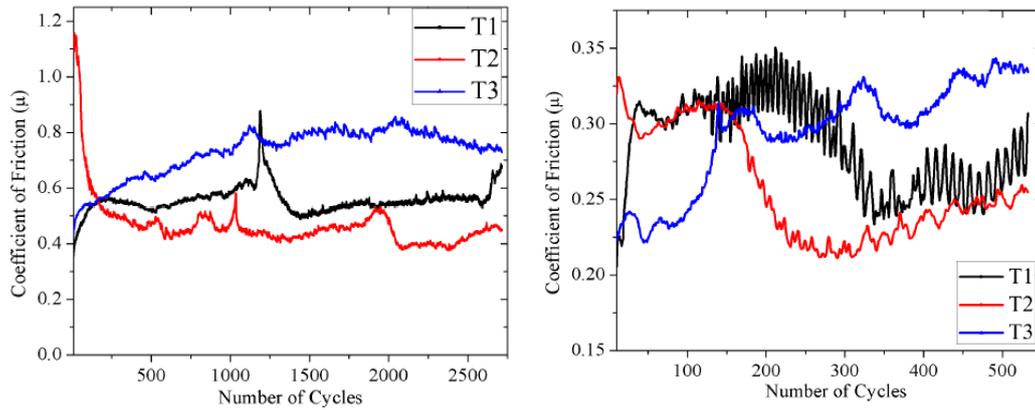


Figura 12.- Variación del CoF con cargas de 30N a 100 rpm (izq.) y a 500 rpm (der.) [24].

Conclusiones y trabajos a futuro

Existe suficiente evidencia de que los comportamientos en desgaste y fricción de las estructuras construidas por FDM en PLA tendrán fuerte dependencia al tipo de arquitectura. La mejora del rendimiento tribológico se deberá evaluar detenidamente para cada aplicación dependiendo también de la contraparte, dureza, topografía y reactividad química. Por otro lado, el tiempo y las velocidades de deslizamientos influirán en las modificaciones de las propiedades por el calor por fricción.

Las arquitecturas más compactas con altos porcentajes de densidad de relleno muestran un desgaste menor. Contrariamente las arquitecturas con menor densidad de relleno se desgastan más fácilmente. Según el patrón de relleno y con menor densidad de relleno pueden atrapar debris que vuelven a adherirse al pin y desprenderse nuevamente para transferirse con partículas más finas al disco como contraparte.

Se prevé a futuro una detallada planificación y ejecución experimental en el tribómetro pin on disk sobre arquitecturas/patrones de relleno y densidades de relleno ensayadas en contrapartes con distintas topografías. Esto permitirá evaluar forma de debris y films transferidos que serán puntos clave para establecer un patrón de comportamiento tribológico.

Referencias

- [1] Pakkanen, J., Manfredi, D., Minetola, P., & Iuliano, L. (2017). About the use of recycled or biodegradable filaments for sustainability of 3D printing: State of the art and research opportunities. *Sustainable Design and Manufacturing 2017: Selected papers on Sustainable Design and Manufacturing* 4, 776-785.
- [2] Kishore, R., Moorthy, M. V. y Gokul, P. S. (2021). Fabricación aditiva con composites de ácido poliláctico (PLA). *EnJournal of Physics: Conference Series* (Vol. 2027, No. 1, p. 012008). IOP Publishing.
- [3] Pinero Vega D.; Batista Ponce M.; Valerga Pureta A. P.; Vazquez Martinez J. M. & Fernandez Vidal S. P. (2018). A Comparison of Macro and Microgeometrical Properties of Specimens Made With a FDM Commercial Printer and its Opensource Retrofit Version, *Proceedings of 29th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, Zadar*, ISSN 1726-9679, ISBN 978-3-902734-20-4, Katalinic B. (Ed.), pp.1108- 1115, Published by DAAAM International, Vienna, DOI: 10.2507/29th.daaam.proceedings.158
- [4] Jap N. S. F.; Pearce G. M.; Hellier A. K.; Russell N.; Parr W. C. & Walsh W. R. (2019), The Effect of Raster Orientation on the Static and Fatigue Properties of Filament Deposited ABS polymer, *International Journal of Fatigue*, Vol. 124., July 2019, 328-337, ISSN 0142-1123
- [5] Akhouni B. & Behraves A. H. (2018), Effect of Filling Pattern on the Tensile and Flexural and Mechanical Properties of FDM 3D Printed Products, *Experimental Mechanics an International Journal*, Vol. 11340, December 2018, ISSN 0014-4851
- [6] Kumar N.; Jain P. K.; Tandon P. & Pandey P. M. (2018), The Effect of Process Parameters on Tensile Behavior of 3D Printed Flexible Parts of Ethylene Vinyl Acetate (EVA), *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 35, August 2018, 317-326, ISSN 1526-6125

- [7] Babagowdam; Kadavera Math R. S.; Goutham R. & Srinivas Prasad K. R. (2017). Study of Effects on Mechanical Properties of PLA Filament Which is Blended With Recycled PLA Materials, Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/310/1/012103> Accessed: 2019-08-06
- [8] Byberg K. I.; Gebisa A. W. & Lemu H.G. (2018), Mechanical Properties of ULTEM 9085 Material Processed by Fused Deposition Modeling, *Polymer Testing*, Vol. 72, December 2018, 335-347, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.10.040>
- [9] Pandzic, A., Hodzic, D., & Milovanovic, A. (2019). Influence of material colour on mechanical properties of PLA material in FDM technology. In *Proceedings of the 30th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation*, Zadar, ISSN (pp. 1726-9679).
- [10] Vaezi M., Chua C. K., (2011) Effects of layer thickness and binder saturation level parameters on 3D printing process, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 53 275–284
- [11] Anhita R., Arunachalam S., Radhakrishnan P. (2001) Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling, *Journal of Materials Processing Technology* 118 385–388.
- [12] Rodriguez J. F., Thomas J. P., Renaud J. E. (2003) Design of fused-deposition ABS components for stiffness and strength, *Journal of Mechanical Design* 125 545–551.
- [13] Lee B. H., Abdullah J., Khan Z. A. (2005) Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object, *Journal of Materials Processing Technology* 169 54–61.
- [14] Rodriguez J. F., Thomas J. P., Renaud J. E. (2001) Mechanical behavior of acrylonitrile butadiene styrene ABS fused deposition materials. Experimental investigation, *Rapid prototyping Journal* 7 148–158
- [15] Chacón J. M., Caminero M. A., García-Plaza E., Núñez P. J. (2017). Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Materials & Design*, 124, 143- 157.
- [16] Maries I-T., Vilau C., Pustan M. S., Dudescu C., Crisan H. G. (2020) Determining the tribological properties of different 3D printing filaments.
- [17] Tomanik, E. (2013). Modelling the hydrodynamic support of cylinder bore and piston rings with laser textured surfaces. *Tribology International*, 59, 90–96.
- [18] Quazi M. M., Fazal M. A., Haseeb A., Yusof F., Masjuki H. H., & Arslan A. (2016). Laser-based surface modifications of aluminum and its alloys. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 41(2), 106–131.
- [19] Sugihara, T., & Enomoto, T. (2012). Improving anti-adhesion in aluminum alloy cutting by micro stripe texture. *Precision Engineering*, 36(2), 229–237.
- [20] Shinkarenko A., Kligerman Y., Etsion I. (2009). The effect of surface texturing in soft elasto-hydrodynamic lubrication. *Tribology International*, 42(2), 284–292.
- [21] Mohamed O. A., Masood S. H., Bhowmik J. L. (2017) A parametric investigation of the friction performance of PC-ABS parts processed by FDM additive manufacturing process.
- [22] Renganathan, S. (2021). Efecto del patrón de llenado y la velocidad de impresión en las características de fricción del polímero de ácido poliláctico impreso FDM. *Avances en materiales y tecnologías de procesamiento*, 1-10.
- [23] Ando M., Biroosz M., Gehlen G. S., Neis P. D., Ferreira N. F., Sukumaran J. (2021). Surface plastic flow of three-dimensional printed polylactic acid in the tribological study of surface patterned polymer. *Measurement Science and Technology*, 33(2), 024001.
- [24] Aziz R., Ul Haq M.I., Raina A. (2020) Effect of surface texturing on friction behaviour of 3D printed polylactic acid (PLA), *Polymer Testing*.