

Coeficiente de fricción de piezas poliméricas construidas aditivamente

Friction coefficient of additively manufactured polymeric parts

Presentación: xx/10/2024

Andrés Bories Otondo

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Bahía Blanca. Departamento Ingeniería Mecánica
andres.bories97@gmail.com

Karen Montes de Oca

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Bahía Blanca. Departamento Ingeniería Mecánica
karen.montesdeoca@hotmail.com

Marcelo Tulio Piovan

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Bahía Blanca. Grupo de Estudio de Materiales (GEMAT)
mpiovan@frbb.utn.edu.ar

Resumen

En este artículo se presentan los estudios efectuados para determinar, mediante procedimientos experimentales, las propiedades de fricción de piezas construidas aditivamente con filamentos poliméricos termo-rígidos. Los métodos experimentales están basados en una variante del clásico ensayo de plano inclinado, aunque en un dispositivo de diseño propio. Para ambos casos se construyó un banco de ensayo apropiado. Con este procedimiento se puede determinar el coeficiente de fricción dinámico. Se proponen probetas ad-hoc de diseño propio para evaluar diversas características de terminación superficial, interacción de materiales, etc., que afectan la variación del coeficiente de fricción en piezas impresas. Los especímenes del ensayo se construyen con 3 tipos comunes de filamentos empleados en la impresión 3D por el método de deposición de filamento. Particularmente, se evalúan Poli ácido láctico (PLA), Poliestireno de alto impacto (HIPS) y Polietileno modificado con Glicol (PETG).

Palabras clave: Coeficiente de fricción, PLA, HIPS, PETG, impresión 3D

Abstract

This article shows the studies performed in order to determine, by means of experimental procedures, the friction properties of pieces additively manufactured with thermoset polymeric filaments. The experimental procedures are based on an alternative to the classical inclined plane test, although with a test rig of own design. With this procedure, it is possible to determine the dynamic friction coefficient. Ad-hoc specimens of own design are proposed to evaluate various features of surface finishing, materials, etc., which affect the variation of the friction coefficient in printed parts. The test specimens are constructed with 3 common types of filaments employed in 3D printing by the filament deposition method (FDM). Particularly Polylactic Acid (PLA), High Impact Poly Styrene (HIPS) and Polyethylene Terephthalate modified with Glycol (PETG) are evaluated.

Keywords: Friction coefficient, PLA, HIPS, PET, 3D printing

Introducción

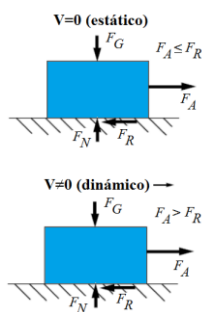
La construcción aditiva (o impresión 3D), desde su aparición revolucionaria en la industria de comienzos de siglo XXI, ha ido modificando los estereotipos de diseño de piezas que tienen que interactuar por deslizamiento relativo entre sí. En particular la tecnología denominada “Modelado por Deposición de Filamento (MDF)” es la más conocida y utilizada para construir piezas poliméricas. Desde hace no más de 12 años se está convirtiendo en una herramienta invaluable para diseñar partes de aplicaciones deslizantes, como el envasado de alimentos, la industria aeroespacial, la fabricación de automóviles y la ingeniería biomédica, entre otras. En estos sistemas, algunas piezas de formas complejas se pueden producir fácilmente con tecnología de impresión 3D a un costo relativamente bajo sin desperdiciar insumos. Los materiales poliméricos pueden lograr buenas propiedades de fricción y desgaste para cojinetes y aplicaciones de bujes en dichas áreas debido a la capacidad de formar una transferencia de película delgada en la superficie de contacto del metal (u otros materiales) que ayuda a reducir el coeficiente de fricción (Chisu et al., 2021; Stoimenov et al., 2024).

Si bien existen muchísimos estudios sobre las propiedades mecánicas de cuerpos construidos por MDF (Tymrak et al, 2014), la mayoría versa sobre límites elásticos a tracción o flexión, algunos a torsión, módulos de elasticidad, etc. Sin embargo, la determinación de propiedades de fricción de piezas impresas por MDF es una preocupación reciente a pesar de su importancia (Stoimenov et al., 2024), y en consecuencia con escasez informativa. Así pues en este trabajo se presenta un estudio preliminar de las propiedades de fricción de piezas impresas por MDF con distintos filamentos (PLA, HIPS, PETG) y deslizando respecto de varios materiales. En particular se estudia el coeficiente de fricción dinámico. Para ello se construyó un banco de ensayo “ad hoc”. Se evaluaron distintas alternativas de terminación superficial cotejando y correlacionando con aspectos de rugosidad y otras características materiales.

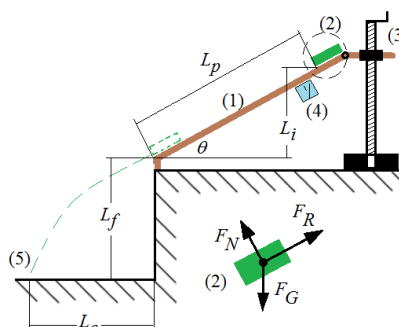
Descripción teórica y metodológica

El coeficiente de fricción es la relación entre la fuerza de rozamiento y la fuerza de contacto ejercidas entre dos superficies en deslizamiento relativo. Este coeficiente, conceptualmente, representa la dificultad con que la superficie de un material se desliza respecto de la superficie de otro material. Se distinguen dos clases de rozamiento: el rozamiento estático, en la que aún no hay un movimiento efectivo de los cuerpos entre sí (aunque inminente), y el rozamiento dinámico, en el que las superficies se mueven una respecto a la otra con velocidades y aceleraciones prescritas. En la Fig. 1(a) se muestra diagramas de cuerpo libre con las fuerzas activas en el fenómeno de deslizamiento de ambos casos de fricción. En tal figura se identifican en un cuerpo genérico elemental la fuerza de fricción (F_R), la fuerza normal (F_N), la fuerza gravitatoria o peso (F_G), la fuerza activa (F_A) y las condiciones que se establecen para la ocurrencia de los casos estático y dinámico. De acuerdo con la definición clásica de la Ley de Coulomb, el coeficiente de fricción se puede determinar a partir de conocer la fuerza de fricción y la fuerza normal en la superficie de contacto, es decir:

$$\mu = F_R / F_N \quad (1)$$



(a) Diagrama de fuerzas



(b) Dispositivo de ensayo

Figura 1: Descripción de fuerzas en los coeficientes de fricción y del dispositivo de ensayo

Para la medición de los coeficientes de fricción dinámico se ha concebido un prototipo basado en el clásico ensayo sobre plano inclinado (Hu et al., 2016), aunque contemplando la posibilidad de modificar el ángulo de inclinación en forma controlada a través de un tornillo de elevación. En la Fig. 1(b) se puede ver un esquema del dispositivo de ensayo con las indicaciones de distancias y posiciones para la comprensión de la metodología. En particular, el dispositivo se compone de un plano inclinado (1), donde se ubica el cuerpo (2), cuyo detalle con las fuerzas actuantes se muestra en la misma figura. La inclinación del plano (1) se puede controlar manual (o automáticamente) con el sistema de tornillo-manivela (o motor) incorporado (3) y cuya valoración angular se constata por medio de un goniómetro (4), o bien por medición de las distancias que aparecen en la figura (de contar con el instrumento apropiado). El procedimiento implicará la elevación controlada del plano hasta que se produzca el movimiento de deslizamiento, y el cuerpo caiga en una caja de arena, donde se registra el punto de caída (5). Con ello se toman las todas las dimensiones necesarias del experimento y a través de análisis dinámico de todo el fenómeno (inicio de movimiento, deslizamiento, salida del plano inclinado y punto de caída final) se puede estimar el coeficiente de fricción dinámico (μ_d) que se calcula recurriendo a la siguiente expresión:

$$\mu_d = \tan[\theta] - \frac{L_c^2}{[4L_p \cos^3[\theta](L_f - L_c \tan[\theta])]} \quad (2)$$

La Ec. (2) es resultado de un modelo de análisis propuesto recientemente en la literatura técnica (Hu et al., 2016). En caso de no contar con un goniómetro, el ángulo θ se puede calcular con la medición de las distancias dispuestas en la Fig. 2(b) y la aplicación de trigonometría básica. Téngase presente que L_p y L_f son datos fijos, mientras que L_c y L_i son distancias que variarán ensayo tras ensayo. Nótese que de la Ec. (2) surge la típica fórmula para el cálculo del coeficiente de fricción estático de los textos de mecánica clásica (Young y Freedman, 2009) despreciando el segundo término.

Se ha seleccionado tres materiales típicos para construcción de piezas por MDF: Poli-ácido láctico (PLA), Poli-estireno de alto impacto (HIPS), y Poli-etileno con Glicol (PETG). La superficie del plano inclinado se puede intercambiar para evaluar deslizamiento entre diversos tipos de materiales, en particular se ha utilizado madera con lijado fino y acrílico. Se ha diseñado una probeta patrón (de 70x50x5 mm), como la que se muestra en la Fig. 2(a), los orificios se han dispuesto para poder montar pesos adicionales en el ensayo. Para cada material de impresión se han construido especímenes con dos disposiciones de impresión como las que se muestran en la Fig. 2(b). La denominación del sentido de orientación sigue, por comodidad, la jerga internacional en lengua inglesa. En la Fig. 2(c) se puede observar la diferencia en la terminación superficial para el ensayo. En la Tabla 1 se muestra la configuración de impresión de cada material.

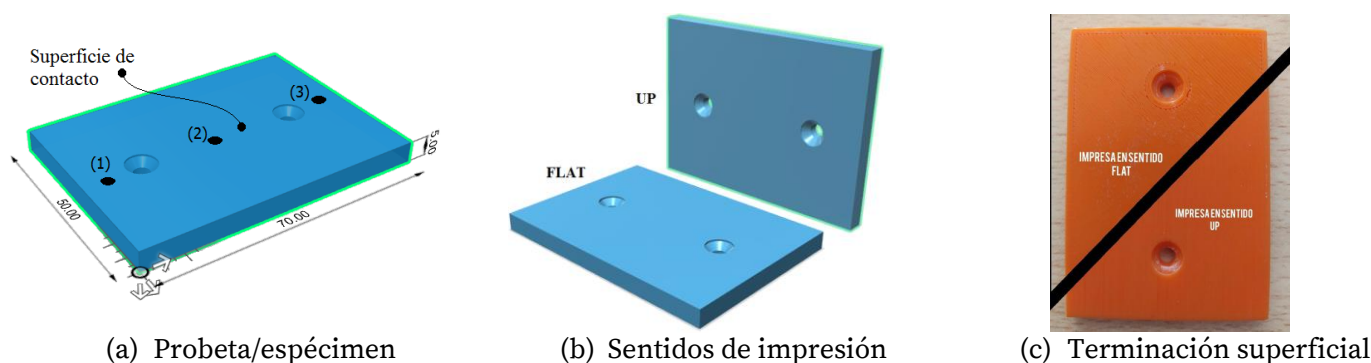


Figura 2: Descripción de las probetas

Para cada material (PLA, HIPS y PETG) se construyen probetas para ensayos independientes sobre superficies de madera como en acrílico, y contemplando dos casos de carga adosadas a la probeta para darle mayor peso (de 26 gr y 55 gr) y constatar su influencia efectiva. Una vez realizados los ensayos con la superficie de impresión en crudo, se efectúa un procedimiento de pulido de la misma superficie de probeta y se repiten los ensayos previos. Este procedimiento involucró el uso de una lijadora de cinta con el reemplazo de tres cintas de lijado hasta grano 220. Para unificar el pulido sabiendo que los materiales poseen diversas

propiedades, cada probeta fue lijada en la dirección de ensayo entre 10 y 12 segundos bajo carga de 50 gr. en cada granulometría de lija. Al principio y final de cada secuencia de ensayo se registra la rugosidad R_a de las superficies para cada espécimen.

Parámetros	PLA	HIPS	PETG
Temperatura de Pico [°C]	215-220	225-230	235-240
Temperatura de cama [°C]	60	95-100	85-90
Velocidad de impresión [mm/s]	40	40	40
Espesor de Capa [mm]	0.2	0.2	0.2
Relleno interno [%]	30	30	30

Tabla 1: Configuración de impresión para las probetas

El primer ensayo consistió en determinar las propiedades de Rugosidad Aritmética Media R_a (ISO 4287) de las probetas y de las superficies donde se deslizarían. Esto se ha efectuado empleando un rugosímetro electrónico (Marca Taylor-Hobson, modelo Surtronic DUO), el cual realiza la integración automática para el cálculo de R_a según ISO 4287. El procedimiento implicó el registro de tres medidas independientes de R_a en cada uno de los tres puntos distintivos de la probeta que se indican en la Fig. 2(a). Con tales registros se extrae la media aritmética, desvío estándar y coeficiente de variación (mismos que dan una cota de la dispersión del ensayo sobre la rugosidad), propios de cada probeta, para finalmente compilar los estadísticos de cada juego de materiales y sentido de impresión. Luego se realizó el ensayo en ambas superficies del plano inclinado con 50 muestras independientes empleado el peso de 26 gr. Posteriormente se han efectuado unos 10 ensayos adicionales con peso de 55 gr, observando para los tres materiales (PLA, HIPS, PETG) y en ambas superficies que no hay incidencia estadísticamente representativa (diferencia de promedios en cada caso menor al 4.0%) del peso en la determinación del coeficiente de rozamiento dinámico, tal como se deslinda al analizar la Ec. (2). Luego de toda la serie de ensayos en cada caso (material, superficie y modo constructivo), se evalúa nuevamente la rugosidad R_a de las superficies para determinar niveles de variación.

Material	Impreso	Probeta	R_a Previa	Dif. [%] a Lijada	R_a Final	Dif [%] a Lijada	Dif. [%] Previa- final
PETG	UP	Natural	12,9	---	7,9	---	38,8
		Lijada	5,6	56,9	2,8	64,7	49,9
	FLAT	Natural	15,6	---	6,4	---	58,7
		Lijada	4,0	74,5	2,6	60,3	35,6
HIPS	UP	Natural	12,6	---	7,3	---	42,3
		Lijada	3,0	76,4	2,0	72,7	33,3
	FLAT	Natural	33,9	---	27,6	---	18,7
		Lijada	5,2	84,6	3,4	87,7	34,8
PLA	UP	Natural	16,8	---	9,4	---	44,4
		Lijada	10,7	36,1	4,6	50,6	57,0
	FLAT	Natural	17,0	---	14,7	---	13,5
		Lijada	16,4	3,7	14,0	4,9	14,6

Tabla 2: Promedio de Rugosidad Aritmética Media, R_a (μm), de las probetas.

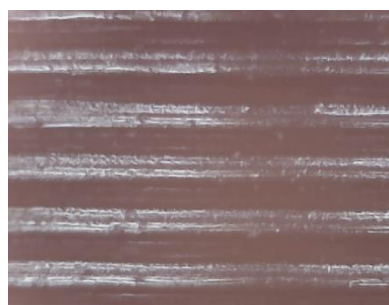
En la Tabla 2 se muestra la Rugosidad R_a de las superficies de las distintas clases de probetas antes del ensayo y luego del ensayo. En particular se trata del promedio de todas las muestras para cada juego de material y forma de construcción. Si bien se consignan los promedios, a modo complementario se desea enfatizar que los coeficientes de variación oscilaron entre 8% y 25%. A su vez, se puede observar que hay una disminución muy importante en la rugosidad para HIPS y PET cuando comparan las superficies al natural con las lijadas; siendo algo menor la variación porcentual en el caso del PLA. Ahora bien cuando se evalúan las rugosidades previas al

ensayo y posteriores se nota otra disminución importante, lo cual pone en evidencia un desgaste ocasionado por el deslizamiento. Algo similar se observa en la Tabla 3, donde se muestra la Rugosidad R_a previa y final de las superficies del plano inclinado. Los tres valores para cada estado se han tomado en el inicio (P1), medio (P2) y final (P3) de la carrera de deslizamiento. Si bien los niveles originales de rugosidad son bajos se nota una disminución por desgaste.

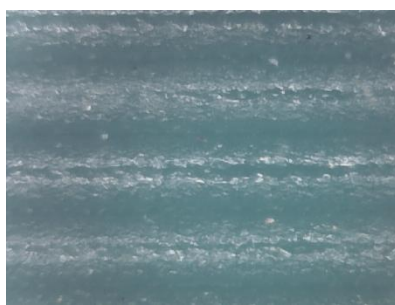
Material	Estado inicial			Estado Final		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3
Madera	5.23	4.59	3.88	1.92	1.32	2.13
Acrílico	0.37	0.11	0.14	0.19	0.08	0.02

Tabla 3: Promedio de Rugosidad Aritmética Media, R_a (μm), de las superficies del plano inclinado.

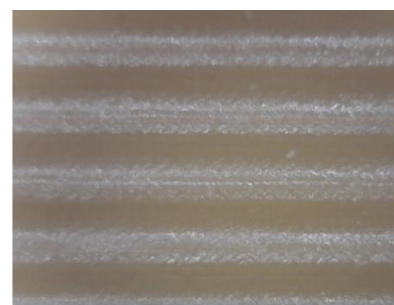
En la Fig. 3 se muestran fotos de ampliación (entre 25X y 35X) de las superficies de algunas probetas, con o sin alisado superficial en su estado original previo al ensayo. En las Fig. 3(a), 3(b) y 3(c) se muestran las superficies de las probetas al natural. Nótese el estriado típico de la configuración constructiva UP. En las Fig. 3(d) a 3(f) se muestran las homónimas superficies pero con el tratamiento de abrasión previo, para disminuir la rugosidad superficial.



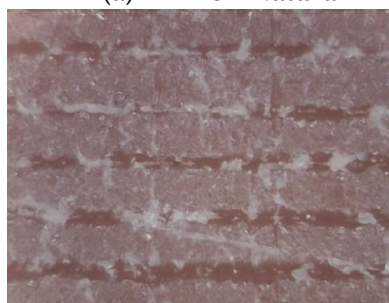
(a) PET UP Natural



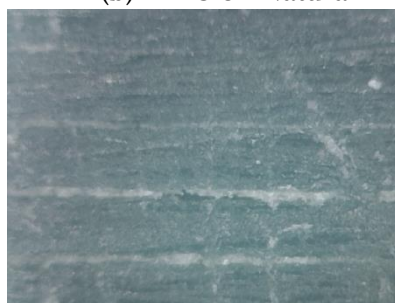
(b) HIPS UP Natural



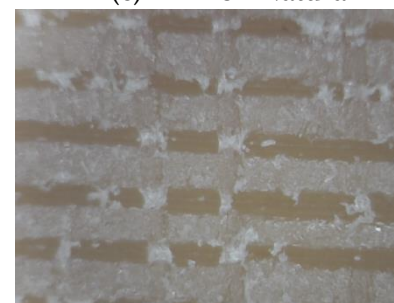
(c) PLA UP Natural



(d) PET UP Lijado



(e) HIPS UP Lijado



(f) PLA UP Lijado

Figura 3: Fotos de las superficies de algunas probetas al natural y lijadas.

Ahora bien en la Tabla 4 se muestran los promedios de los ensayos efectuados para la determinación de los coeficientes de fricción dinámicos en cada uno de los casos. Se incorpora también el Coeficiente de Variación (CDV) definido como la razón entre el desvío estándar y el promedio de cada una de las series de 50 ensayos, con el cual se evidencia el nivel de dispersión de los resultados. Se puede observar que el CDV en la mayoría de los casos de la interacción entre los plásticos de impresión y la madera son menores que el 5% lo cual se considera como estadísticamente muy bueno. Por otro lado en el caso del acrílico, se han observado comportamientos disímiles y con niveles de dispersión mayores.

En el caso del PETG en contacto con madera, al pasar de una configuración superficial natural a una lijada, se ha observado que el coeficiente de fricción dinámico disminuye entre el 10% y 20%. No es lo mismo para HIPS y PLA que muestran mayormente incrementos del coeficiente de fricción a pesar que disminuye la rugosidad en todos los casos lijados respecto de los naturales. En cuanto a la configuración de construcción tanto para el PETG como para el PLA no se observa una influencia relevante entre las configuraciones UP y

FLAT con su superficie al natural; aunque existen diferencias sensibles si la superficie de la probeta está lijada. Aun así, se puede observar para los tres plásticos de impresión (en caso de superficie al natural) tienen diferencias marcadas entre sí, independientemente de la configuración constructiva. Esto es, el PLA tiene $\mu_d \cong 0.326$, el PETG tiene $\mu_d \cong 0.345$ y el HIPS tiene $\mu_d \cong 0.385$. Estas diferencias marcadas se mantienen con las probetas lijadas, aunque con valores distintos.

Material	Impreso	Probeta	Madera		Acrílico	
			Promedio	CDV [%]	Promedio	CDV [%]
PETG	UP	Natural	0,343	3,150	0,293	9,382
		Lijada	0,317	3,940	0,249	11,290
	FLAT	Natural	0,346	3,165	0,292	9,411
		Lijada	0,291	4,347	0,272	12,090
HIPS	UP	Natural	0,369	2,801	0,294	6,899
		Lijada	0,381	4,349	0,369	8,509
	FLAT	Natural	0,421	3,568	0,309	7,161
		Lijada	0,404	2,698	0,346	4,988
PLA	UP	Natural	0,329	2,740	0,295	8,256
		Lijada	0,364	2,830	0,347	5,078
	FLAT	Natural	0,324	3,280	0,281	11,230
		Lijada	0,394	3,020	0,304	9,268

Tabla 4: Coeficientes de rozamiento dinámico para los distintos casos.

En el caso del PETG en contacto con madera, al pasar de una configuración superficial natural a una lijada, se ha observado que el coeficiente de fricción dinámico disminuye entre el 10% y 20%. No es lo mismo para HIPS y PLA que muestran mayormente incrementos del coeficiente de fricción a pesar que disminuye la rugosidad en todos los casos lijados respecto de los naturales. En cuanto a la configuración de construcción tanto para el PETG como para el PLA no se observa una influencia relevante entre las configuraciones UP y FLAT con su superficie al natural; aunque existen diferencias sensibles si la superficie de la probeta está lijada. Aun así, se puede observar para los tres plásticos de impresión (en caso de superficie al natural) tienen diferencias marcadas entre sí, independientemente de la configuración constructiva. Esto es el PLA tiene $\mu_d \cong 0.326$, el PETG tiene $\mu_d \cong 0.345$ y el HIPS tiene $\mu_d \cong 0.385$. Estas diferencias marcadas se mantienen con las probetas lijadas, aunque con valores distintos.

En el caso de deslizamiento de los plásticos de impresión con el acrílico, suceden aspectos algo diversos y opuestos a los que ocurren en contacto con madera. En efecto, prácticamente en todos los casos de material (PETG, HIPS y PLA) con superficie al natural, independientemente de su configuración de construcción parecería no haber diferencia sensible en el coeficiente de rozamiento, pues todos los casos estarían en un entorno del 4% respecto de $\mu_d \cong 0.295$. Mientras que, como se explicó en el párrafo anterior, eso no ocurre con la superficie de madera del plano inclinado.

Algo notoriamente común vinculado al PETG tanto para deslizamiento en madera o acrílico, se observa en los especímenes con superficie lijada, cuyo coeficiente de rozamiento promedio es bastante menor que su contraparte natural, en un rango que va entre el 8% y el 18%. Mientras que en los otros dos materiales HIPS y PLA, el coeficiente de rozamiento dinámico es por lo general mayor en las probetas lijadas que en las naturales a pesar que la rugosidad disminuye.

Conclusiones

En este trabajo se ha presentado un estudio preliminar sobre las propiedades de fricción de piezas impresas construidas con tres clases de polímeros convencionales empleados en la impresión 3D de tecnología MDF. En particular se determinó por medios experimentales el coeficiente de fricción dinámico bajo diversos sentidos de construcción aditiva de la probeta, con diversas calidades de terminación de la superficie de contacto de la probeta y con deslizamiento respecto distintos materiales.

Se ha observado mayormente que en la medida que disminuye la rugosidad R_a , disminuye el coeficiente de rozamiento dinámico en los tres materiales lo cual era esperado. Las piezas impresas con superficie en estado natural y en deslizamiento con el acrílico no mostraron diferencias sensibles entre sí, a diferencia de lo que ocurre con la interacción madera – plásticos.

Este trabajo permite tener una valoración experimental para futuros estudios y disponer tal información en modelos de interacción de fricción en mecanismos impresos. En próximos estudios se pretende explorar la viabilidad de las metodologías de las normas internacionales para la determinación de efectos tribológicos en plásticos impresos, aunque corresponde aclarar que tales normas (e.g. ASTM D-1894) fueron concebidas para plásticos inyectados, y no se disponen de normas específicas para cuerpos impresos.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de la Universidad Tecnológica Nacional y Conicet. A su vez desean agradecer al Ing. Gerardo Pender del Laboratorio de Ingeniería Mecánica por sus indicaciones en el proceso de medición de rugosidades

Referencias

- Chisiu, G., Stoica, N.A., Stoica, A.M. (2021). Friction Behavior of 3D-printed polymeric material used in liding systems. *Materiale Plastice* 58(1), 176-185. <https://doi.org/10.37358/MP.21.1.5457>.
- Hu, A., Peachey, B. (2016). Redesigning an Experiment to Determine the Coefficient of Friction. *Journal of Emerging Investigators*. June 27, 2016. <https://doi.org/10.59720/15-077>.
- ISO 4287 (1997). International Standard Organization. Geometrical Product Specifications (GPS) Surface texture: Profile method, term, definitions and surface texture parameters.
- Stoimenov, N., Kandeva, M., Zagorsky, M., Panev, P. (2023). Static and Kinetic Friction of 3D Printed Polymers and Composites. *Tribology in Industry* 46(1), 97-106. DOI:10.24874/ti.1546.08.23.10
- Tymrak, B.M., Kreiger M., Pearce, J.M. (2014). Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions, *Materials and Design* 58, 242-246.
- Young H, Freedman, R. (2009). *Física Universitaria*, Volumen I, Edición 12°. Editorial Pearson Educación, Mexico. ISBN: 978-607-442-288-7.