

Influencia del Bruñido con Bola en la mejora de la calidad superficial y el rendimiento mecánico de piezas obtenidas por FFF

Héctor García de la Torre¹, Ariadna Chueca De Bruijn², Giovanni Gómez-Gras³, Marco A. Pérez⁴

¹Group of Applied Mechanics and Advanced Manufacturing, Dep. Ingeniería Industrial, IQS School of Engineering, Universitat Ramon Llull, España. Email: hectorgarcia@iqs.url.edu

²Group of Applied Mechanics and Advanced Manufacturing, Dep. Ingeniería Industrial, IQS School of Engineering, Universitat Ramon Llull, España. Email: ariadnachuecad@iqs.url.edu

³Group of Applied Mechanics and Advanced Manufacturing, Dep. Ingeniería Industrial, IQS School of Engineering, Universitat Ramon Llull, España. Email: giovanni.gomez@iqs.url.edu

⁴Group of Applied Mechanics and Advanced Manufacturing, Dep. Ingeniería Industrial, IQS School of Engineering, Universitat Ramon Llull, España. Email: marcoantonio.perez@iqs.url.edu

Resumen

Las piezas obtenidas por fabricación aditiva suelen requerir un tratamiento posterior para compensar las carencias inherentes al proceso de fabricación, que suele ser deficiente, por ejemplo, en cuanto a la calidad superficial o el rendimiento mecánico de los productos finales. En esta investigación se utiliza el bruñido con bola, una técnica sostenible y de bajo coste, basada en la deformación plástica de las superficies, para minimizar estos efectos indeseables. Para ello, se ha diseñado una herramienta específica y se han utilizado modelos estadísticos para determinar los parámetros del proceso que ofrecen los mejores resultados. Se han cuantificado los efectos del bruñido sobre la calidad superficial y dimensional, la dureza y el comportamiento mecánico a través de ensayos de flexión y fatiga, y se han comparado los resultados con las muestras prístinas. Este estudio, que representa una aportación novedosa en la aplicación del bruñido con bola sobre piezas fabricadas con filamento fundido de tres materiales diferentes, expone las bondades de esta técnica y aporta generalizaciones para su aplicación.

Palabras clave: Bruñido con bola, fabricación aditiva, rugosidad superficial, rendimiento mecánico, vida a fatiga.

Abstract

Parts obtained by additive manufacturing often require post-treatment to compensate for shortcomings inherent in the manufacturing process, which is often deficient, for example, in terms of surface quality or mechanical performance of the final products. In this research, ball burnishing, a sustainable and low-cost technique based on plastic deformation of surfaces, is used to minimize these undesirable effects. To this end, a specific tool has been designed, and statistical models have been used to determine the process parameters that give the best results. Furthermore, the effects of the ball burnishing on the surface and dimensional quality, hardness and mechanical behavior have been quantified through flexural and fatigue tests, and the results have been compared with pristine samples. This study, which represents a novel contribution to the application of ball burnishing to cast filament parts made of three different materials, shows the benefits of this technique, and provides generalizations for its application.

Keywords: Ball Burnishing, Additive Manufacturing, Surface Roughness, Mechanical performance, Fatigue Life

1. Introducción

En los últimos años, las piezas y componentes que contienen superficies complejas han incrementado su importancia dentro de la industria, debido al aumento de la funcionalidad que supone disponer, por ejemplo, de geometrías específicas, componentes ensamblados, formas ergonómicas u optimizaciones topológicas que añaden valor a los productos finales. El auge en la producción de piezas con geometrías y superficies complejas se ha visto claramente favorecido por la revolución industrial que ha supuesto la expansión de las tecnologías de fabricación aditiva que, en la actualidad, posibilitan la construcción de componentes que hasta hace pocos años eran imposibles de fabricar o a costes excesivos [1]–[3]. Sin embargo, a pesar de los prometedores campos de aplicación asociados a la fabricación aditiva (FA) en general y a la fabricación por filamento fundido (FFF) en particular [4], [5], la tecnología aún no es capaz de alcanzar los requisitos de calidad y resistencia para una amplia gama de aplicaciones industriales.

En particular, la rugosidad superficial de las piezas resultantes es uno de los indicadores de calidad más polémicos para garantizar un óptimo valor de uso de las piezas finales, ya que influye en las propiedades funcionales de los componentes, incluidas las tolerancias de ensamblaje, las relaciones de coincidencia, la resistencia a la fatiga, la dureza superficial, el rozamiento, la resistencia al desgaste o la estanqueidad. Este parámetro está fuertemente influenciado por la forma elíptica de los filamentos depositados capa a capa, que provoca el llamado “efecto escalera” en las superficies impresas [6], [7] y está directamente relacionado con las condiciones y el proceso de fabricación [8], [9]. En consecuencia, es necesaria la aplicación de procesos de acabado capaces de conferir a las piezas las características exigidas [10], [11].

Diversos estudios se han decantado por la aplicación de postprocesos de acabado convencionales en piezas obtenidas por FFF [12]–[14]. Entre ellos, se encuentra el bruñido con bola (BB), una técnica de acabado que destaca por su sencillez, nula producción de residuos y la capacidad de obtener superficies finales con muy buen acabado [15]. Además, las herramientas de bruñido pueden acoplarse a máquinas de fabricación convencionales ampliamente utilizadas, reduciendo así los costes de operación [16].

El BB es un proceso de deformación plástica severa (DPS) que consiste en la acción localizada de un indentador sobre la superficie del componente. La fuerza aplicada es capaz de mitigar las irregularidades generadas durante cualquier proceso de fabricación desplazando material desde los picos de la superficie hasta los valles [16].

En los materiales de base metálica, se han identificado previamente los parámetros fundamentales del BB que influyen en la rugosidad superficial y la dureza [17], [18], incluyendo el diámetro de la bola, la fuerza aplicada, la velocidad de avance, la anchura de la pasada lateral, el número de pasadas de la herramienta y el uso de lubricantes [19]. Además, varios estudios han evidenciado los beneficios de aplicar esta metodología en metales con la finalidad de mejorar la superficie, el coeficiente de fricción y la tasa de desgaste [20], [21] y, más discretamente, la dureza superficial [22]. Por último, aunque la naturaleza del BB plantea algunos retos cuando se trata de formas intrincadas, se han conseguido avances en este sentido [23], [24], haciéndolo más relevante para piezas de mayor complejidad.

Sin embargo, las ventajas del BB sobre piezas poliméricas obtenidas por FFF no quedan definidas. Hasta la fecha, pocos estudios abordan el análisis de la influencia del BB sobre piezas FFF, como el publicado por [25]. Este trabajo preliminar, que se basó en un único material: PEI, utilizando una herramienta de BB convencional, revela que las piezas tratadas consiguen duplicar su vida a fatiga, cuentan con una reducción del 70% de la rugosidad superficial y una mejora significativa en la absorción de la energía del impacto, siendo la magnitud de la fuerza aplicada la que evidencia una mayor contribución sobre los resultados.

A la vista de estos resultados, este trabajo tiene como objetivo validar el proceso de BB para la mejora de la superficie y el rendimiento de los componentes poliméricos obtenidos por FFF. En concreto, se ha utilizado una novedosa herramienta de BB para piezas poliméricas de FA. Esta propuesta se implementa sobre tres polímeros termoplásticos ampliamente utilizados, con diferentes características y usos, como son, el ácido poliláctico (Tough PLA), el policarbonato (PC) y el policarbonato biocompatible (PC-ISO). El uso de materiales de diferente naturaleza permite profundizar en la comprensión de la eficacia de este post-procesamiento mecánico en piezas poliméricas FFF, permitiendo hacer generalizaciones y proporcionando un procedimiento junto con los parámetros óptimos para su implementación. La rugosidad, la textura y la dureza se utilizan como indicadores de la mejora de la calidad superficial, las deformaciones inducidas por la carga se utilizan como indicadores de la calidad dimensional, y la resistencia a la flexión y la vida a fatiga se utilizan para evaluar la mejora del rendimiento mecánico. Los efectos de los parámetros del BB se determinan mediante métodos estadísticos, de calidad superficial y dimensional y de análisis de imágenes de microscopía.

2. Metodología

Las muestras utilizadas en este estudio son de dos tipologías diferentes, diseñadas para validar la calidad superficial y el comportamiento mecánico. Para el primer caso, se han propuesto unas placas de 150 mm de longitud y una sección transversal de 110 x 4 mm² sobre las cuales se han llevado a cabo diferentes estrategias de bruñido (figura 1). Esto ha posibilitado la determinación del rango de magnitudes en los que se encuentran los parámetros influyentes que producen mejoras relevantes en la rugosidad superficial. Dado que un componente impreso tiene al menos dos tipos de superficies con características diferenciadas, estas placas se han obtenido por duplicado. Las primeras, colocadas de manera horizontal, en posición XY (similar a las superficies superior e inferior de cualquier pieza) y, las segundas, se han impreso en orientación XZ (similar a los contornos típicos de cualquier componente).

Para la evaluación del rendimiento mecánico, se fabricaron muestras de flexión a tres puntos y de fatiga por flexión siguiendo las recomendaciones de las correspondientes normas de ensayo ASTM D790 [26] y ASTM D7774 [27].

Como ya se ha anticipado, los materiales empleados han sido el Tough PLA, el PC y el PC-ISO. Tanto las placas como las muestras de Tough PLA y PC se obtuvieron con la impresora Ultimaker S5, mientras que las de PC-ISO se fabricaron con un equipo de impresión profesional Fortus 400mc. Las muestras se fabricaron con un relleno lineal de ± 45 grados, una densidad del 100% y un único contorno exterior. La altura de la capa se fijó en 0.1 mm para Tough PLA y PC y en 0.254 mm para PC-ISO.

2.1. Proceso de bruñido con bola

El bruñido con bola se llevó a cabo mediante una herramienta diseñada y fabricada específicamente para esta investigación, acoplada a una fresadora de control numérico computarizado (CNC). Dicha herramienta consta de un casquillo inferior, una guía, una rosca de precarga y sujeción, un alojamiento para el muelle, un muelle de tensión-compresión y un pasador de fijación. El indentador esférico de 10 mm de diámetro, es de acero endurecido al cromo (AISI 52100) y está rodeado por dos pistas de rodamientos esféricos de 2 mm de diámetro del mismo material (figura 2).

Para el proceso de bruñido, las placas descritas se fijaron en los extremos en un bloque de resina epoxi mediante tornillos. Las probetas estandarizadas se fijaron dentro de un molde de silicona Sylgard 184, lo que garantizó su correcto posicionamiento sin impedir la expansión del material por efecto de la fuerza aplicada.

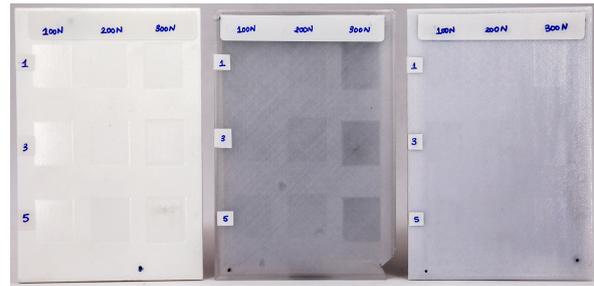


Figura 1. Placas diseñadas para validar las diferentes estrategias de BB. Fuente: elaboración propia.

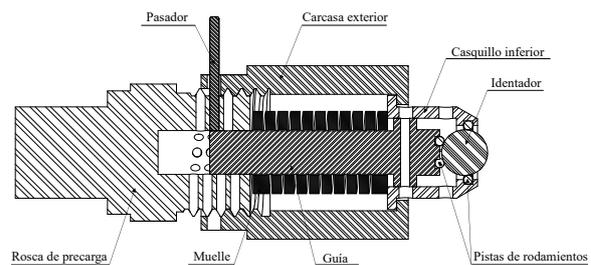


Figura 2. Sección de la herramienta diseñada. Fuente: elaboración propia.

En base a resultados obtenidos previamente a esta investigación, se ha determinado la evaluación de dos parámetros del proceso de bruñido especialmente influyentes: la fuerza aplicada y el número de pasadas de la herramienta.

El ancho de paso lateral (distancia entre dos pasadas de bruñido adyacentes sucesivas) y la velocidad de avance de la herramienta se han reportado con poca relevancia en otros trabajos [9], [28]. En consecuencia, los valores han sido fijados en 0.32 mm y 1000 mm min⁻¹, respectivamente.

2.2. Diseño de experimentos

Para determinar la influencia de los parámetros del BB elegidos, se llevó a cabo un diseño factorial completo de 3². Se probaron tres valores numéricos (niveles) de dos variables. El objetivo de esta primera campaña experimental es identificar los niveles de los factores que producen los mejores resultados en términos de calidad superficial. La tabla 1 resume la distribución de factores y niveles en el diseño de experimentos seguido.

Tabla 1. Factores experimentales y sus niveles.

Factor	Niveles		
Fuerza Aplicada [N]	100	200	300
Número de pasadas	1	3	5

Fuente: elaboración propia.

2.3. Análisis superficial

Para determinar el impacto sobre la rugosidad media aritmética (R_a) y sobre la altura media máxima del perfil de rugosidad (R_z), y sus desviaciones, se utilizó un rugosímetro Rugosurf 20, TESA Technology. Las mediciones se realizaron según los procedimientos establecidos en la norma correspondiente [29] antes y después de ser sometidas al BB. Para cada muestra se midió cada parámetro diez veces.

Adicionalmente, se ha realizado un análisis dimensional con el objetivo de determinar las variaciones de las cotas de las muestras resultantes de la deformación inherente al proceso de BB. La dimensión nominal se estableció a partir de la sección transversal de las piezas impresas ($4 \times 10 \text{ mm}^2$). La calidad dimensional se evaluó antes y después del BB, considerando la precisión de fabricación de cada impresora.

Para evaluar la influencia del BB en la dureza de las muestras, se realizaron pruebas según la norma ISO 868:2003 [30]. Las muestras se probaron con un durómetro Shore D al obtener un valor inferior a 20 con el indentador del tipo A. Se añadió una masa de 5 kg para garantizar la repetibilidad, y las mediciones se registraron 15 ± 1 s después del contacto firme entre el pie de apoyo y la muestra. Los resultados se obtuvieron calculando la mediana de cinco indentaciones espaciadas al menos 6.0 mm entre ellas.

2.4. Comportamiento mecánico

El comportamiento mecánico de cada uno de los materiales se evaluó mediante ensayos normalizados de flexión a tres puntos y de fatiga por flexión.

Los ensayos de flexión a tres puntos se llevaron a cabo en probetas con una sección transversal de $4 \times 10 \text{ mm}^2$ y una longitud de 127 mm siguiendo el procedimiento A de la norma ASTM D790 [26]. Se empleó una velocidad de ensayo de 1.71 mm min^{-1} . Se han utilizado cinco probetas de cada material y configuración, todas obtenidas del mismo lote de impresión. Se ensayaron hasta la rotura o una pérdida de carga del 20%. Se reporta la resistencia a la flexión, la deformación en el punto máximo y el módulo de flexión.

Los ensayos de fatiga se realizaron en una máquina de ensayos provista de un utillaje de flexión a tres puntos siguiendo el procedimiento A de la norma ASTM D7774 [27]. La frecuencia y la distancia entre apoyos se fijaron en 5 Hz y 64 mm, respectivamente. Para construir las curvas S-N R-1, se ensayaron las probetas utilizando cargas equivalentes al 20%, 40%, 60% y 80% de la máxima resistencia a la flexión de cada material y configuración de fabricación.

3. Resultados

3.1. Influencia del bruñido con bola en la rugosidad superficial

Se obtuvieron valores de R_a y R_z para cada conjunto de experimentos. Los resultados se procesaron mediante el software estadístico R 4.1.2. con el fin de extraer las contribuciones y los valores de probabilidad (valores p) de cada variable (fuerza aplicada y número de pasadas). Para este estudio se ha tomado un valor menor de 0.05, ya que representa que se rechaza la hipótesis nula al existir menos del 5% de probabilidad de que los resultados sean aleatorios y las conclusiones obtenidas se consideran estadísticamente significativas.

Tabla 2. Parámetros óptimos de bruñido con bola resultantes del diseño de experimentos.

	XY				XZ			
	R_a		R_z		R_a		R_z	
	p valor	Contribución						
Tough PLA								
Fuerza	0.003	65 %	0.005	69 %	0.006	59 %	0.006	68 %
Pasadas	0.005	27 %	0.703	23 %	0.091	39 %	0.045	27 %
Error	-	8 %	-	18 %	-	2 %	-	5 %
PC								
Fuerza	0.000	92 %	0.000	97 %	0.047	50 %	0.009	71 %
Pasadas	0.546	6 %	0.516	2 %	0.067	46 %	0.061	28 %
Error	-	2 %	-	1 %	-	4 %	-	1 %
PC – ISO								
Fuerza	0.002	63 %	0.009	60 %	0.004	86 %	0.001	84 %
Pasadas	0.054	29 %	0.075	39 %	0.057	10 %	0.029	13 %
Error	-	8 %	-	1 %	-	4 %	-	3 %

Fuente: elaboración propia.

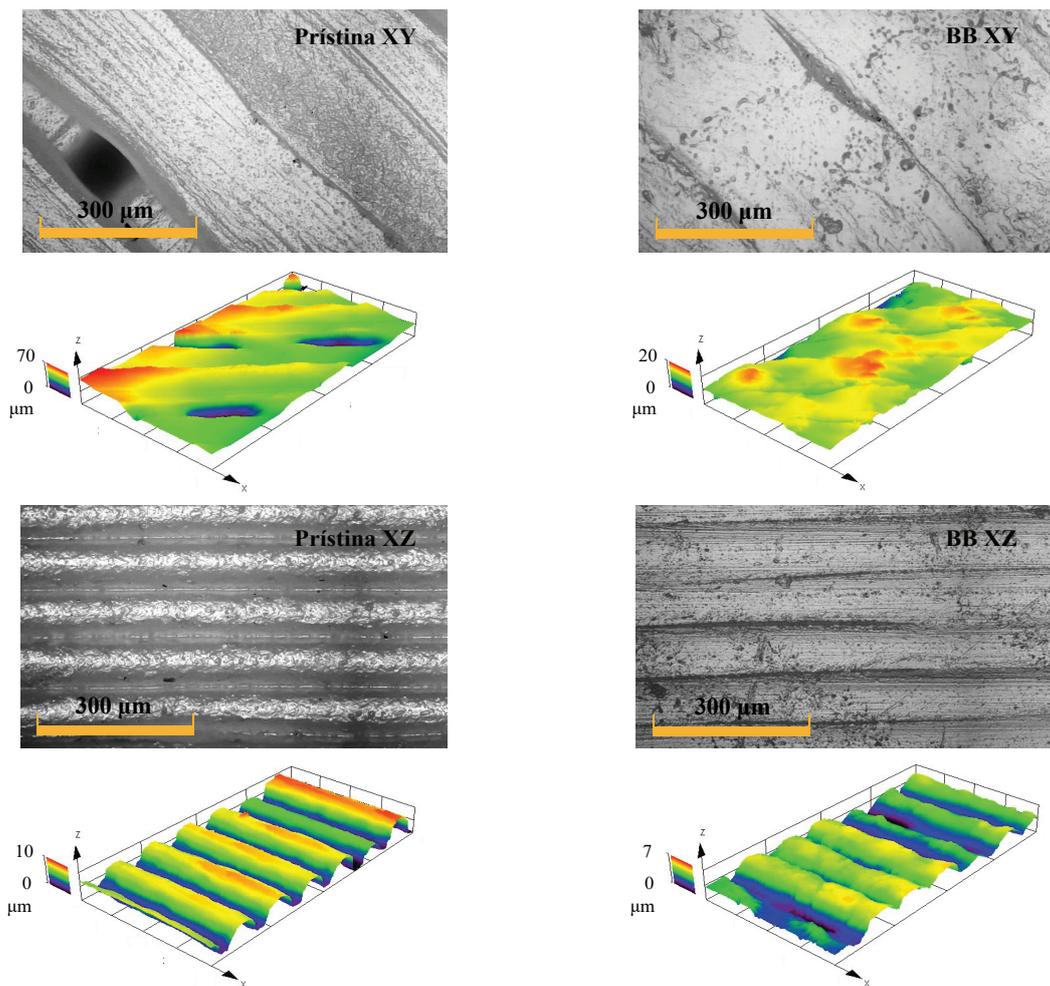


Figura 3. Imágenes de microscopía óptica (superficie y textura 3D) de muestras XY y XZ, prístinas y bruñidas con bola, utilizando los parámetros óptimos del proceso. La marca de escala naranja es de 300 μm. Fuente: elaboración propia.

En la tabla 2 se presentan los valores-p junto con la contribución de cada factor sobre la respuesta. Estos valores no se ven afectados por la magnitud y el rango de un efecto y dependen en gran medida del tamaño de la muestra. Los resultados obtenidos son coherentes con la literatura consultada [20]–[22], [25] y muestran que la fuerza de bruñido es la variable con mayor influencia en el resultado final del proceso. Como ya se ha comentado, esto se debe a que este factor tiene un valor-p inferior a 0.05 para todos los materiales estudiados y explica al menos el 50% de la variación de R_a y R_z tanto para las muestras XY como XZ. En cambio, el número de pasadas contribuye en menor medida al resultado final. Sin embargo, en la mayoría de los casos, el valor-p muestra que su influencia no se ha obtenido a partir de valores aleatorios, y que la contribución porcentual en las respuestas es mayor que la contribución del error residual medio (<5%).

La evidencia de estos resultados puede observarse en las imágenes de microscopía presentadas en la figura 3, donde aparecen los perfiles de superficie de las muestras prístinas y bruñidas utilizando los parámetros

óptimos de proceso. En el caso de las bruñidas se aprecia claramente una reducción del perfil de textura y, al mismo tiempo, las imágenes revelan que los contornos entre los filamentos están distorsionados, lo que sugiere una clara densificación. La tabla 3 presenta los parámetros óptimos del proceso. La mejor calidad superficial se obtuvo en las muestras PC-ISO XY con una variación de R_a y R_z del 93% y 90% respectivamente, habiendo sido bruñidas con una fuerza aplicada de 300 N y 5 pasadas de la herramienta.

Tabla 3. Parámetros óptimos de bruñido con bola resultantes del diseño de experimentos.

Material	Disposición	Fuerza [N]	Pasadas
Tough PLA	XY	200	3
	XZ	200	3
PC	XY	300	3
	XZ	300	3
PC-ISO	XY	300	3
	XZ	300	5

Fuente: elaboración propia.

3.2. Influencia del bruñido con bola en la calidad dimensional

La figura 4 presenta las mediciones de ancho y altura de las muestras prístinas y bruñidas. La desviación dimensional de las prístinas para XY y XZ no supera el 6.0% y el 2.5%, respectivamente. La desviación XZ es menor, ya que la altura de la muestra se determina por los ejes XY, que suelen poseer una mayor precisión que el eje Z. Esto se debe principalmente a la dependencia del eje Z del ancho del filamento depositado y del controlador del movimiento de dicho eje. Por lo tanto, la orientación de fabricación influye en las dimensiones finales de la pieza, por lo que hay que tener en cuenta la dimensión más restrictiva.

La anchura de la sección se ha visto aumentada debido a la fuerza aplicada y, en consecuencia, la altura se ha reducido. Este fenómeno no es proporcional para ambas dimensiones, lo que indica una densificación de las muestras. No obstante, para todos los materiales estudiados, es posible garantizar unas dimensiones cercanas a las del modelo digital. La diferencia máxima entre la altura de las muestras BB y la esperada es del 1.25% en ambas configuraciones. Si se tiene en cuenta que las tolerancias de impresión están en torno a 0.04 mm^{-1} (Fortus 400 mc) y 0.06 mm^{-1} (Ultimaker S5), la variación en la calidad dimensional podrían explicarse por el efecto combinado del BB y el error de impresión asociado a la tecnología FFF.

3.3. Influencia del bruñido con bola en la dureza superficial

Los ensayos de dureza se realizaron tanto en las probetas prístinas como en las bruñidas, en las condiciones de ensayo definidas en la Tabla 3. No se observó ninguna infiltración del indentador entre los filamentos después de las mediciones. Los resultados comparativos se muestran en la figura 5.

Los valores más altos de dureza superficial corresponden a las probetas impresas en la orientación XZ. Esto puede atribuirse a la posición del contorno en esta orientación, ya que es más rígido que las capas de relleno, que están expuestas al BB en la orientación XY. En este caso, el penetrador D atravesó el patrón de relleno interior, que no es tan rígido como los contornos exteriores. La diferencia entre la dureza en las muestras XY y XZ denota la influencia de la capa exterior y el relleno interior, demostrando sus propiedades desiguales y su cohesión.

En general, la dureza superficial se ha mejorado en todas las configuraciones y materiales para las muestras BB. La mejora es de hasta un 10%, confirmando así las variaciones producidas por el BB con respecto a la integridad de la superficie.

En concordancia con [31], una reducción de la sección transversal (sin pérdida de masa) da lugar a un aumento de la densidad de las muestras tratadas; es decir, hay un mayor número de capas en el mismo espacio, lo que equivaldría a reducir la altura de las capas y a reforzar las uniones entre ellas.

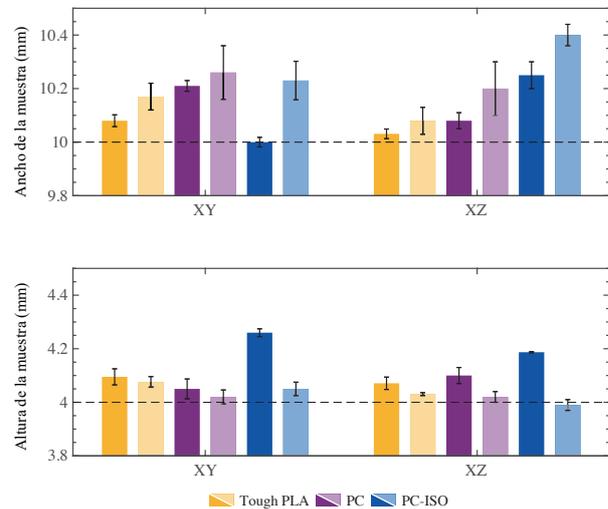


Figura 4. Valores de anchura y altura de las probetas prístinas y BB. El proceso se ha realizado en ambas caras utilizando los parámetros óptimos. La línea discontinua marca el valor nominal establecido en el archivo STL a partir del cual se fabricaron las piezas. Las columnas de colores más claros representan las muestras BB. Fuente: elaboración propia.

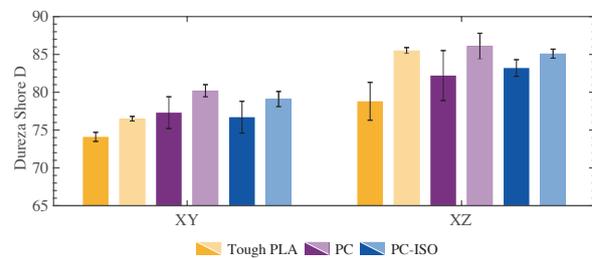


Figura 5. Dureza Shore D de muestras prístinas y BB. Las columnas de colores más claros representan las muestras BB. Fuente: elaboración propia.

3.4. Ensayos de flexión estática

Los valores medios de la resistencia a la flexión, la deflexión a la resistencia a la flexión y el módulo de flexión se resumen en la tabla 4. En la figura 6 se presentan las curvas de tensión-deformación representativas de los ensayos de flexión de las probetas prístinas y bruñidas. Los resultados difieren en cuanto a la rigidez, la carga máxima y el fallo del material en función de la construcción interna de las probetas y de su orientación de fabricación, evidenciando la inherente anisotropía de la FFF. Las probetas BB presentan un mayor módulo de flexión y su resistencia a la flexión no se ve afectada.

Tabla 4. Propiedades mecánicas de flexión.

		XY		XZ	
		Prístina	Bruñida	Prístina	Bruñida
Tough PLA	Resistencia a flexión [MPa]	42.7 ± 0.8	40.0 ± 3.3	51.3 ± 5.3	51.7 ± 5.3
	Deformación [%]	3.4 ± 0.1	4.0 ± 0.4	2.8 ± 0.4	2.4 ± 0.4
	Módulo a flexión [MPa]	1671 ± 99	1580 ± 185	2056 ± 228	2452 ± 205
PC	Resistencia a flexión [MPa]	115.0 ± 5.7	93.1 ± 7.3	120.4 ± 2.1	100.16 ± 11.1
	Deformación [%]	5.6 ± 0.9	5.7 ± 1.3	6.6 ± 0.9	6.2 ± 0.5
	Módulo a flexión [MPa]	2497 ± 174	2783 ± 78	2241 ± 124	2681 ± 76
PC – ISO	Resistencia a flexión [MPa]	70.4 ± 0.6	68.3 ± 1.3	82.8 ± 0.6	70.5 ± 8.3
	Deformación [%]	7.4 ± 0.1	7.4 ± 0.2	6.8 ± 0.1	6.2 ± 1.7
	Módulo a flexión [MPa]	1369 ± 26	1782 ± 99	1654 ± 36	1980 ± 204

Fuente: elaboración propia.

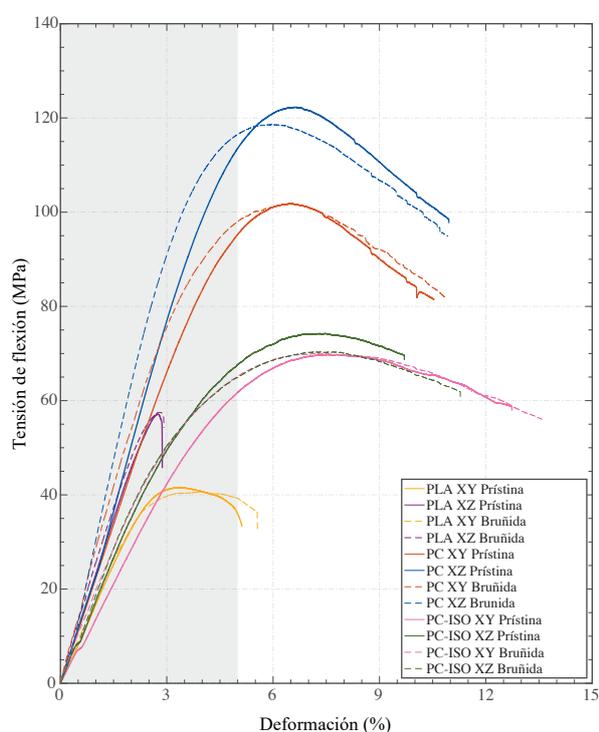


Figura 6. Curvas representativas de tensión-deformación resultantes de los ensayos de flexión para todos los materiales ensayados. Fuente: elaboración propia.

En general, se observó un discreto aumento del módulo de flexión de las muestras tratadas. Esto se atribuye a la rigidez y plastificación de las capas exteriores de las muestras bruñidas y puede explicar las mejoras en las propiedades de flexión de las muestras bruñidas con respecto a las prístinas. Las tensiones de compresión resultantes introducidas por el proceso de bruñido tienden a acercar las cadenas de polímeros, lo que da lugar a un aumento de los contactos binarios con importantes fuerzas de repulsión no ligadas. El número de estas conexiones binarias aumenta con el incremento de la carga, lo que conduce a una reacción de endurecimiento. La mayoría de los contactos binarios, aunque no todos, se liberan cuando cesa la carga [32], [33], lo que sugiere la presencia de cierta

recuperación elástica hasta un límite. A partir de ese punto, es imposible una mayor densificación de las muestras y, en consecuencia, tanto la calidad superficial como el comportamiento mecánico se ven afectados.

Otro fenómeno observable es la falta de variación de la resistencia a la flexión de las muestras. El BB afecta principalmente a las capas exteriores y adyacentes de dos maneras: por compactación o adelgazamiento, y por disminución de la porosidad superficial. El primer efecto influye sobre ambas configuraciones. El gradiente de tensiones soportado por las capas internas, así como la unión interna de estas capas (que está estructurada en ± 45°) [3], aumenta a medida que la capa externa de las muestras adelgaza, lo que provoca una disminución de la resistencia a las tensiones. El segundo efecto anticiparía resultados más positivos en las probetas XY. La unión intracapa de la capa superior, que soporta parte de la tensión debido a la disposición de ± 45 grados de los filamentos, se ve reforzada por el BB. En cambio, en las muestras XZ, la orientación de los filamentos en la capa exterior es completamente perpendicular a la dirección de la tensión aplicada, por lo que la adhesión intracapa tiene una menor influencia. En consecuencia, las muestras XY no se ven afectadas, mientras que, en las muestras XZ, se produce una pequeña disminución de la resistencia a la flexión.

3.5. Comportamiento a fatiga

La vida útil de las probetas prístinas y bruñidas se evaluó mediante ensayos de fatiga por flexión a tres puntos. Cabe destacar que, según la recomendación de la norma de ensayo, los resultados presentados corresponden al número de ciclos en los que el desplazamiento superó el 10%, es decir, el límite elástico, ya que ninguna de las probetas se fracturó antes de dicho punto.

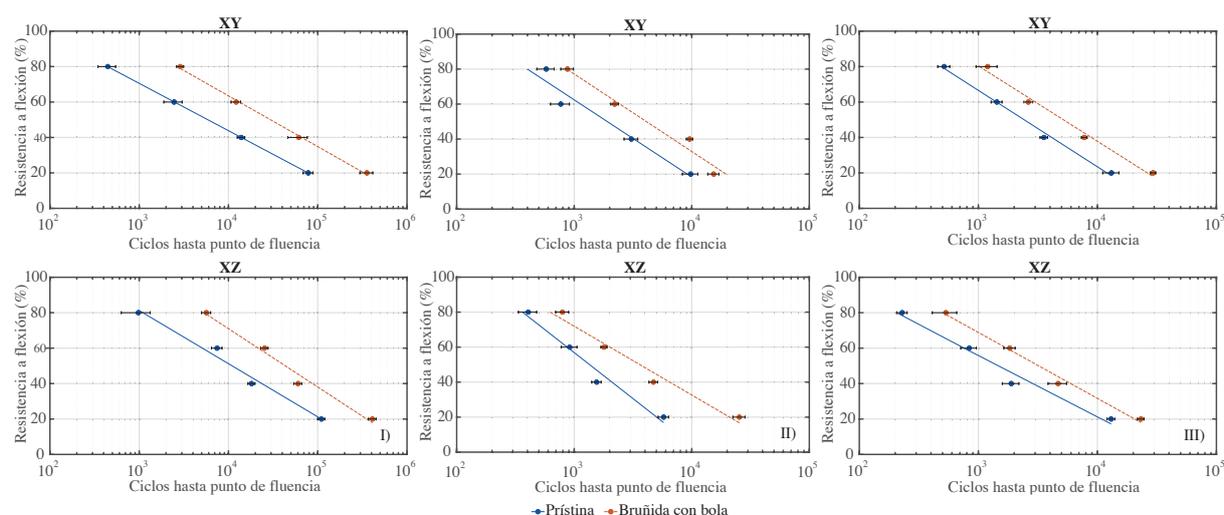


Figura 7. Curvas S-N R-1 obtenidas de los ensayos de fatiga por flexión a 3 puntos para cada orientación de fabricación. I) Tough PLA, II) PC y III) PC-ISO. Fuente: elaboración propia.

La figura 7 muestra los resultados obtenidos para ambas orientaciones de fabricación. Estos valores se calcularon a partir de la media de un mínimo de tres repeticiones.

Debido a las diferencias observadas en la resistencia a la flexión de las muestras prístinas y bruñidas durante los ensayos de flexión, el criterio para el valor de la tensión de referencia en las probetas ha sido el caso más desfavorable. Por lo tanto, todas las probetas se ensayaron con la misma tensión de oscilación y se pudo obtener una comparación bidireccional de los resultados. En todas las configuraciones y materiales, se observan mejoras entre el 100 y el 500%, que son coherentes con las mejoras comunicadas para el metal BB [23]. En base a los resultados, se considera que la aparición de tensiones residuales de compresión en las capas exteriores de las muestras bruñidas, junto con la posterior densificación y endurecimiento de la superficie, reduce la aparición y propagación de grietas y, por tanto, es responsable de la mejora a la respuesta dinámica de las muestras [34].

3.6. Conclusiones

El rendimiento de la herramienta diseñada y su aplicación en piezas FFF han resultado satisfactorios. Ha sido calibrada dentro de un rango de magnitudes de fuerza que proporciona mejoras en la calidad superficial y en las prestaciones mecánicas de las piezas tratadas con respecto a las no tratadas. Los resultados reportados avalan la efectividad de este postproceso para componentes obtenidos por FFF independientemente del tipo de polímero.

Se ha evaluado la influencia de la fuerza y el número de pasadas en la calidad superficial de las muestras, y se determinó la combinación de parámetros BB que desembocan en los mejores resultados para cada uno de los materiales presentados. De forma general, la mejora de R_a y R_z para los tres materiales se sitúa en torno al 80% y 77%, respectivamente. Se ha comprobado que la variación dimensional introducida por el BB no supera la desviación estándar inherente al proceso de fabricación. Por lo tanto, el uso de este postproceso es beneficioso para componentes que requieren ser ensamblados. Además, la densificación de las capas externas debida a la compresión introducida por el BB mejoró la dureza superficial de las piezas bruñidas en aproximadamente un 10% en comparación con las muestras de referencia.

El rendimiento mecánico de las piezas impresas se ha visto beneficiado. Los resultados muestran que la compactación del material inducida por el BB tiene una discreta influencia en el módulo de flexión, manteniendo la misma resistencia a la flexión. Esta mejora puede atribuirse a la plastificación y el adelgazamiento de la capa exterior. Sin embargo, la baja variabilidad de los resultados de los ensayos estáticos no permite hacer afirmaciones definitivas.

En cuanto al comportamiento a fatiga, los tres materiales obtienen una mejora sustancial en el número de ciclos alcanzados, logrando el doble de vida respecto a las probetas prístinas. La compactación de las capas dificulta la aparición y propagación de grietas y, en consecuencia, el rendimiento dinámico aumenta notablemente.

4. Referencias

- [1] D. Pramanik, A. Mandal, and A. S. Kuar, "An experimental investigation on improvement of surface roughness of ABS on fused deposition modelling process," *Materials Today: Proceedings*, vol. 26, pp. 860–863, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.01.054.
- [2] M. J. Bermingham, L. Nicastro, D. Kent, Y. Chen, and M. S. Dargusch, "Optimising the mechanical properties of Ti-6Al-4V components produced by wire + arc additive manufacturing with post-process heat treatments," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 753, pp. 247–255, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.jallcom.2018.04.158.
- [3] A. Forés-Garriga, M. A. Pérez, G. Gómez-Gras, and G. Reyes-Pozo, "Role of infill parameters on the mechanical performance and weight reduction of PEI Ultem processed by FFF," *Materials and Design*, vol. 193, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.matdes.2020.108810.
- [4] A. Ceruti, P. Marzocca, A. Liverani, and C. Bil, "Maintenance in aeronautics in an Industry 4.0 context: The role of Augmented Reality and Additive Manufacturing," *Journal of Computational Design and Engineering*, vol. 6, no. 4, pp. 516–526, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.jcde.2019.02.001.
- [5] Piyush, R. Kumar, and R. Kumar, "3D printing of food materials: A state of art review and future applications," in *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 33, pp. 1463–1467. doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.005.
- [6] P. Eswaran, M. Subramaniyan, A. Appusamy, N. S. Annakalyani, and S. R. Pusapati, "Investigations on acute angle parts fabricated fusion deposition modelling parts volumetric shrinkage and surface roughness," in *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 45, pp. 930–935. doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.945.
- [7] M. Ehsanul Haque, D. Banerjee, S. Bikash Mishra, and B. Kumar Nanda, "A Numerical Approach to Measure the Surface Roughness of FDM Build Part," *Materials Today: Proceedings*, vol. 18, pp. 5523–5529, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.07.659.
- [8] A. C. de Bruijn, G. Gómez-Gras, and M. A. Pérez, "A comparative analysis of chemical, thermal, and mechanical post-process of fused filament fabricated polyetherimide parts for surface quality enhancement," *Materials*, vol. 14, no. 19, Oct. 2021, doi: 10.3390/ma14195880.
- [9] R. Jerez-Mesa, Y. Landon, J. A. Travieso-Rodríguez, G. Dessein, J. Lluma-Fuentes, and V. Wagner, "Topological surface integrity modification of AISI 1038 alloy after vibration-assisted ball burnishing," *Surface and Coatings Technology*, vol. 349, pp. 364–377, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.surfcoat.2018.05.061.
- [10] C. de Formanoir, S. Michotte, O. Rigo, L. Germain, and S. Godet, "Electron beam melted Ti-6Al-4V: Microstructure, texture and mechanical behavior of the as-built and heat-treated material," *Materials Science and Engineering A*, vol. 652, pp. 105–119, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.msea.2015.11.052.
- [11] S. Beretta and S. Romano, "A comparison of fatigue strength sensitivity to defects for materials manufactured by AM or traditional processes," *International Journal of Fatigue*, vol. 94, pp. 178–191, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2016.06.020.
- [12] N. E. Uzan, S. Ramati, R. Shneck, N. Frage, and O. Yeheskel, "On the effect of shot-peening on fatigue resistance of AlSi10Mg specimens fabricated by additive manufacturing using selective laser melting (AM-SLM)," *Additive Manufacturing*, vol. 21, pp. 458–464, May 2018, doi: 10.1016/j.addma.2018.03.030.
- [13] S. Afkhami, M. Dabiri, H. Piili, and T. Björk, "Effects of manufacturing parameters and mechanical post-processing on stainless steel 316L processed by laser powder bed fusion," *Materials Science and Engineering A*, vol. 802, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.msea.2020.140660.
- [14] M. Morgano et al., "Investigation of the effect of Laser Shock Peening in Additively Manufactured samples through Bragg Edge Neutron Imaging," *Additive Manufacturing*, vol. 34, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.addma.2020.101201.
- [15] T. A. El-Taweel and M. H. El-Axir, "Analysis and optimization of the ball burnishing process through the Taguchi technique," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 41, no. 3–4, pp. 301–310, Mar. 2009, doi: 10.1007/s00170-008-1485-6.
- [16] R. Avilés, J. Albizuri, A. Rodríguez, and L. N. López De Lacalle, "Influence of low-plasticity ball burnishing on the high-cycle fatigue strength of medium carbon AISI 1045 steel," *International Journal of Fatigue*, vol. 55, pp. 230–244, 2013, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2013.06.024.
- [17] F. J. Shiou and C. H. Chen, "Freeform surface finish of plastic injection mold by using ball-burnishing process," in *Journal of Materials Processing Technology*, Sep. 2003, vol. 140, no. 1-3 SPEC., pp. 248–254. doi: 10.1016/S0924-0136(03)00750-7.

- [18] L. N. L. de Lacalle, A. Rodriguez, A. Lamikiz, A. Celaya, and R. Alberdi, “Five-axis machining and burnishing of complex parts for the improvement of surface roughness,” *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 26, no. 8, pp. 997–1003, Aug. 2011, doi: 10.1080/10426914.2010.529589.
- [19] S. Swirad and R. Wdowik, “Determining the effect of ball burnishing parameters on surface roughness using the Taguchi method,” 2019, vol. 34, pp. 287–292. doi: 10.1016/j.promfg.2019.06.152.
- [20] K. O. Low and K. J. Wong, “Influence of ball burnishing on surface quality and tribological characteristics of polymers under dry sliding conditions,” *Tribology International*, vol. 44, no. 2, pp. 144–153, Feb. 2011, doi: 10.1016/j.triboint.2010.10.005.
- [21] K. O. Low and K. J. Wong, “Tribological effects of polymer surface modification through plastic deformation,” 2011.
- [22] Ł. Janczewski et al., “Effects of ball burnishing on surface properties of low density polyethylene,” *Tribology International*, vol. 93, pp. 36–42, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.triboint.2015.09.006.
- [23] L. Wagner, T. Ludian, and M. Wollmann, “Ball-Burnishing and Roller-Burnishing to Improve Fatigue Performance of Structural Alloys,” *Engineering Against Fracture - Proceedings of the 1st Conference*, pp. 1–11, 2009, doi: 10.1007/978-1-4020-9402-6_1.
- [24] J. A. Travieso-Rodríguez, R. Jerez-Mesa, G. Gómez-Gras, J. Llumà-Fuentes, O. Casadesús-Farràs, and M. Madueño-Guerrero, “Hardening effect and fatigue behavior enhancement through ball burnishing on AISI 1038,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, no. 6, pp. 5639–5646, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.jmrt.2019.09.032.
- [25] A. Chueca de Bruijn, G. Gómez-Gras, and M. A. Pérez, “On the effect upon the surface finish and mechanical performance of ball burnishing process on fused filament fabricated parts,” *Additive Manufacturing*, vol. 46, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.addma.2021.102133.
- [26] “ASTM D790-17, Standard Test Methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2017).(www.astm.org).”
- [27] “ASTM D7774-17, Standard Test Method for flexural fatigue properties of plastics, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2017).(www.astm.org).”
- [28] A. Saldaña-Robles, H. Plascencia-Mora, E. Aguilera-Gómez, A. Saldaña-Robles, A. Marquez-Herrera, and J. A. Diosdado-De la Peña, “Influence of ball-burnishing on roughness, hardness and corrosion resistance of AISI 1045 steel,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 339, pp. 191–198, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.surfcoat.2018.02.013.
- [29] “ISO - ISO 4288:1996, Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Rules and procedures for the assessment of surface texture, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, (1996). (www.iso.org).”
- [30] “UNE-EN ISO 868:2003 Plásticos y ebonita. Determinación de la d...” Accessed: Mar. 04, 2022. [Online]. Available: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0029620>
- [31] M. M. Hanon, J. Dobos, and L. Zsidai, “The influence of 3D printing process parameters on the mechanical performance of PLA polymer and its correlation with hardness,” in *Procedia Manufacturing*, 2020, vol. 54, pp. 244–249. doi: 10.1016/j.promfg.2021.07.038.
- [32] Z. Bartczak, A. Galeski, A. S. Argon, and R. E. Cohen, “On the plastic deformation of the amorphous component in semicrystalline polymers,” *Polymer (Guildf)*, vol. 37, no. 11, pp. 2113–2123, May 1996, doi: 10.1016/0032-3861(96)85856-3.
- [33] Jatin, V. Sudarkodi, and S. Basu, “Investigations into the origins of plastic flow and strain hardening in amorphous glassy polymers,” *International Journal of Plasticity*, vol. 56, pp. 139–155, 2014, doi: 10.1016/j.ijplas.2013.11.007.
- [34] G. Gomez-Gras, R. Jerez-Mesa, J. A. Travieso-Rodríguez, and J. Llumà-Fuentes, “Fatigue performance of fused filament fabrication PLA specimens,” *Materials and Design*, vol. 140, pp. 278–285, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.matdes.2017.11.072.