



Comportamiento durante el mecanizado de componentes ligeros fabricados por PBF-LB

Maialen Martínez-Aguirre¹, Amaia Calleja-Ochoa¹, Gaizka Gómez Escudero², Sarvesh Mishra³, Haizea González-Barrio¹, Luis Norberto López de Lacalle Marcaide²

¹ Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad del País Vasco UPV/EHU, maialen.martinezdeaguirre@ehu.eus; amaia.calleja@ehu.eus; gaizka.gomez@ehu.eus; haizea.gonzalez@ehu.eus; norberto.lzlacalle@ehu.eus

² Departamento de Ingeniería Mecánica, Instituto Indio de Tecnología-Kanpur (IIT-Kanpur), msarvesh@iitk.ac.in

La fabricación aditiva, y en concreto, la fabricación mediante fusión de cama de polvo con láser permite el diseño y fabricación de componentes aligerados, a través de la incorporación de canales o estructuras reticulares internas que resultan en una geometría de pieza de menor volumen y peso. Estos cambios de geometría pueden producir cambios en el comportamiento durante el proceso de mecanizado de acabado de la pieza. Esto es, dependiendo del diseño, de la estructura interna de la pieza, pueden obtenerse variaciones en los esfuerzos de corte durante el proceso de mecanizado, obteniéndose valores menores de los mismos y en consecuencia mejor acabado superficial de la pieza. En este trabajo, se ha estudiado el comportamiento de una geometría de pared delgada sólida en comparación con tres geometrías de pared delgada aligerada con canales internos que presentan diferentes inclinaciones. Así, se ha analizado el comportamiento de las piezas durante el proceso de mecanizado bajo diferentes condiciones de corte, variando la velocidad de corte, el avance, profundidad de pasada radial, profundidad de pasada axial, etc.

1. Introducción

Las estructuras celulares, caracterizadas por una disposición interna de celdas o poros, se encuentran ampliamente en la naturaleza, ofreciendo combinaciones óptimas de ligereza y resistencia. Este tipo de estructuras pueden ofrecer propiedades específicas que no pueden ser proporcionadas por estructuras de tipo sólido [1]. Ejemplo de estos son los huesos humanos o la madera, que presentan configuraciones que maximizan la eficiencia estructural y funcional [2]. Estas estructuras de tipo ‘celular’ abarcan desde espumas, hasta panales y celosías. Las redes, en particular, exhiben numerosas propiedades excepcionales que superan las de las espumas y los canales, como la ligereza, la alta resistencia, la absorción eficiente de energía y la amortiguación de vibraciones. Estos atributos han sido ampliamente estudiados y son objeto de gran interés [3, 4].

La inspiración en estas estructuras naturales ha llevado al desarrollo de materiales celulares artificiales para diversas aplicaciones. Estos materiales buscan replicar las ventajas de ligereza y resistencia observadas en la naturaleza, adaptándolas a necesidades específicas en campos como la ingeniería aeroespacial, biomédica y mecánica [5]. Además, diferentes sectores demandan materiales y estructuras más ligeras manteniendo las propiedades mecánicas de los componentes [6], pero reduciendo su peso, como es el caso de las microestructuras. La estructura de tipo celosía es muy deseable para una multitud de aplicaciones de diseño, debido a sus propiedades excepcionales, como ligereza, alta resistencia y rigidez específicas, disipación de calor eficiente, entre otros beneficios [7].

Las estructuras celulares están definidas por detalles intrincados que son difíciles de replicar utilizando técnicas de fabricación convencionales. Sin embargo, gracias a los avances de la fabricación aditiva, la producción de estas estructuras se ha vuelto cada vez más factible. Las estructuras reticulares de barras repetitivas son las más utilizadas en la fabricación aditiva [8]. Las propiedades de tales estructuras están determinadas por la ubicación de las barras en la celda unitaria, el tamaño de la celda unitaria y la fracción de volumen ocupada por el material sólido. Estos factores también juegan un papel crucial en la definición del peso final de la estructura de celosía.

En este sentido, la fabricación aditiva ha revolucionado la producción de estructuras celulares, permitiendo la creación de geometrías complejas con precisión. Técnicas como la fusión selectiva por láser (PBF-LB) facilitan la fabricación de estructuras reticulares con propiedades mecánicas y térmicas optimizadas [9]. Sin embargo, desafíos como la necesidad de utilizar soportes durante la fabricación o la eliminación de polvo residual en estructuras de celosía pequeñas aún persisten. Además, la reducción del área sólida a través de estructuras reticulares puede reducir las tensiones térmicas y facilitar el proceso de fabricación [10].

Por otro lado, las propiedades mecánicas de las estructuras celulares fabricadas mediante PBF-LB pueden variar según los parámetros de fabricación y la orientación de las celdas unitarias [11-13]. Estudios recientes han analizado la influencia de la anisotropía en procesos de mecanizado, observando variaciones en fuerzas de corte, vibraciones y desviaciones dimensionales en componentes de Inconel 718. En esta línea, la tendencia de las investigaciones recientes se centra en la anisotropía de formación de materiales variando los parámetros y patrones de PBF-LB. Por ejemplo, J.D. Pérez et al [14] analizaron la influencia de la anisotropía en el proceso de mecanizado final (fuerzas de corte y vibraciones) así como las desviaciones dimensionales y la integridad superficial.

La integración de técnicas de fabricación aditiva en el desarrollo de estructuras celulares ha permitido avances significativos en diversas industrias. La investigación continúa enfocándose en optimizar las propiedades mecánicas, reducir las limitaciones de fabricación [15], acabado [16] y ampliar las aplicaciones de estos materiales innovadores. Sin embargo, pese a todos los estudios y avances recientes en este campo, el comportamiento de este tipo de componentes ante procesos de acabado de pieza mediante mecanizado y las posibles ventajas o inconvenientes que su comportamiento pueda mostrar frente a piezas fabricadas mediante métodos tradicionales es aún un campo poco explorado.

En el presente trabajo se ha estudiado el comportamiento de una geometría de pared delgada sólida en comparación con tres geometrías de pared delgada aligerada con canales internos que presentan diferentes inclinaciones. Así, se ha analizado el comportamiento de las piezas durante el proceso de mecanizado bajo diferentes condiciones de corte, variando la velocidad de corte, el avance, profundidad de pasada radial, profundidad de pasada axial, etc.

2. Diseño y material del caso de estudio

La geometría de la pieza de estudio seleccionada para este trabajo consta de un cilindro ‘hueco’ de 54 mm de diámetro exterior y 40 mm de altura. Se han diseñado cuatro geometrías de cilindro, de modo que una de ellas corresponde a una pared delgada sólida, mientras que los otros tres diseños, corresponden a paredes delgadas con canales en su interior, siendo el espesor de las paredes de 100 μm . Estos canales se han diseñado con orientaciones diferentes para cada pieza, presentando un diseño de canales rectos a 90°, otro con canales a 60°, y el tercero con canales a 120°. El diseño puede observarse en la Figura 1.

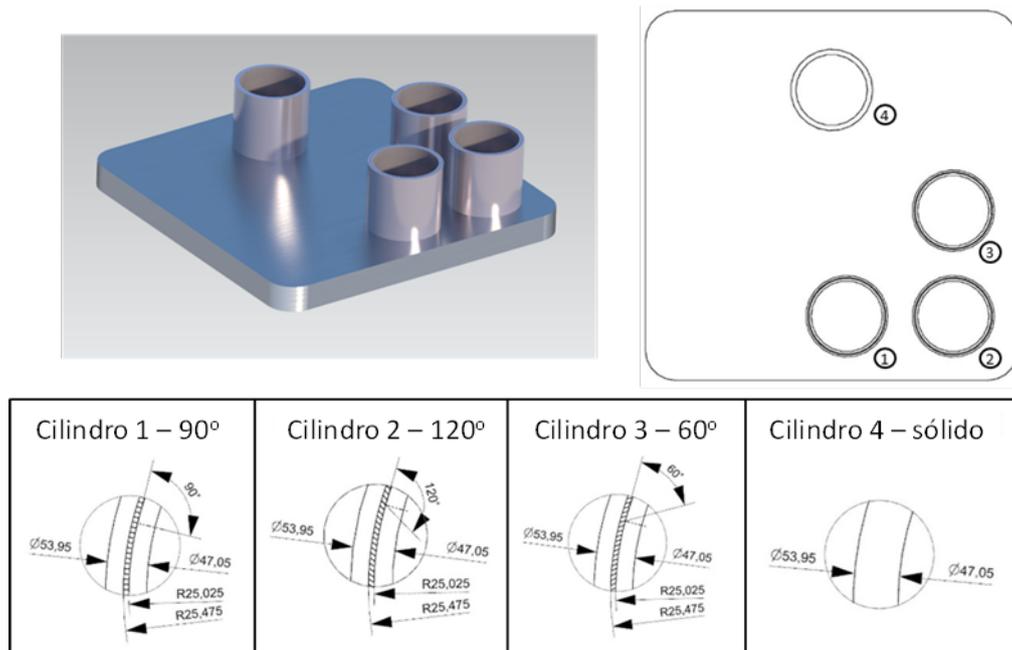


Figura 1: Diseño de las diferentes geometrías estudiadas.

El material seleccionado ha sido Inconel 718. Las propiedades apropiadas de fusión y solidificación convierten al Inconel 718 en una opción común para las técnicas de fabricación aditiva. El polvo Inconel 718 atomizado con gas está compuesto de níquel (Ni), cromo (Cr), hierro (Fe), niobio (Nb), molibdeno (Mo) y otros elementos en trazas. La composición química de Inconel 718 se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1: Composición química Inconel 718

Elemento	Ni	Cr	Fe	Nb	Mo
%	54,14	18,4	17,42	4,85	3,03

3. Fabricación de las piezas de estudio mediante PBF-LB

El equipamiento utilizado para fabricar las piezas (Figura 2) fue una máquina Renishaw AM400 PBF-LB, con atmósfera de gas inerte (Argón). La máquina tiene un volumen de trabajo de 248 mm x 248 mm x 285 mm, lo que delimita las dimensiones máximas de los componentes.



Figura 2: Piezas fabricadas mediante PBF-LB.

Los parámetros de proceso PBF-LB empleados para la fabricación de las piezas test fueron una potencia de láser de 200 W con un tiempo de exposición de 80 μ s para la carcasa (superficie externa) y 124 W y 40 μ s para la generación de la microestructura.

4. Mecanizado de las piezas de estudio

Las cuatro geometrías cilíndricas han sido fresadas exteriormente para analizar el comportamiento durante el proceso de mecanizado de las diferentes geometrías. Se ha medido la dureza de las piezas fabricadas mediante PBF-LB y corresponde a un valor de 46-48 HRC.

Se han programado unas estrategias de mecanizado circulares (Figura 3) para el mecanizado exterior de las geometrías cilíndricas. Así, se han realizado dos pasadas de ‘limpieza’ que han permitido unificar la dimensión del diámetro exterior de los cilindros. Esto ha sido necesario debido a que la fabricación de las piezas mediante fabricación aditiva implica una ligera desviación de la geometría diseñada.

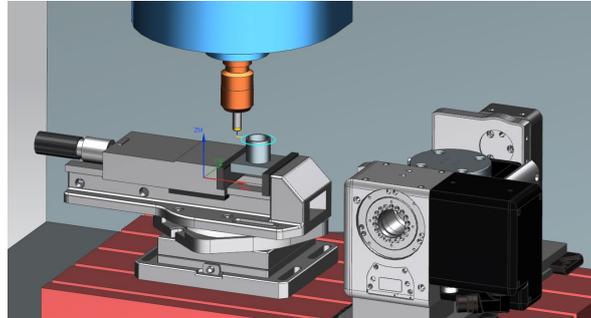


Figura 3: Trayectorias de mecanizado y verificación virtual del proceso de mecanizado.

Se han programado pasadas de mecanizado bajo las siguientes condiciones de corte que se muestran en la Tabla 2. Se ha mantenido constante la profundidad de pasada axial, siendo de 4 mm y el avance por diente de la herramienta. Se ha variado la profundidad de pasada radial, aplicando condiciones de 0,1 mm, 0,2 mm y 0,3 mm. Asimismo se ha variado la velocidad de corte, aplicando velocidades de 65, 80 y 100 m/min.

Tabla 2: Condiciones de mecanizado.

	a_p (mm)	a_e (mm)	V_c (m/min)	f_z (mm/diente)
Geometría cilíndrica pared sólida	4	0,1 – 0,2 – 0,3	65 – 80 – 100	0,2
Geometría cilíndrica pared con canales a 60°	4	0,1 – 0,2 – 0,3	65 – 80 – 100	0,2
Geometría cilíndrica pared con canales a 90°	4	0,1 – 0,2 – 0,3	65 – 80 – 100	0,2
Geometría cilíndrica pared con canales a 120°	4	0,1 – 0,2 – 0,3	65 – 80 – 100	0,2

La herramienta utilizada ha sido una fresa de plaquitas de Ceratizit®, con referencia C251.20.R.03-08-A-60-RS, y tres plaquitas redondas con referencia RDHX 0802M0SN-F50 CTCS245. La selección de la herramienta responde al interés de la empresa Ceratizit® para testear el comportamiento de esta geometría y material de herramienta en el mecanizado de Inconel 718 bajo las condiciones del estudio.

5. Resultados

En este trabajo, se han analizado las piezas desde el punto de vista del proceso de mecanizado, analizando fuerzas y aceleraciones en el proceso de corte. Además, también se han analizado desde un punto de vista del proceso de fabricación, teniendo en cuenta la calidad de los elementos impresos a través de tomografía y SEM (*Scanning electron microscopy*). Por último, se ha analizado el desgaste sufrido por la herramienta.

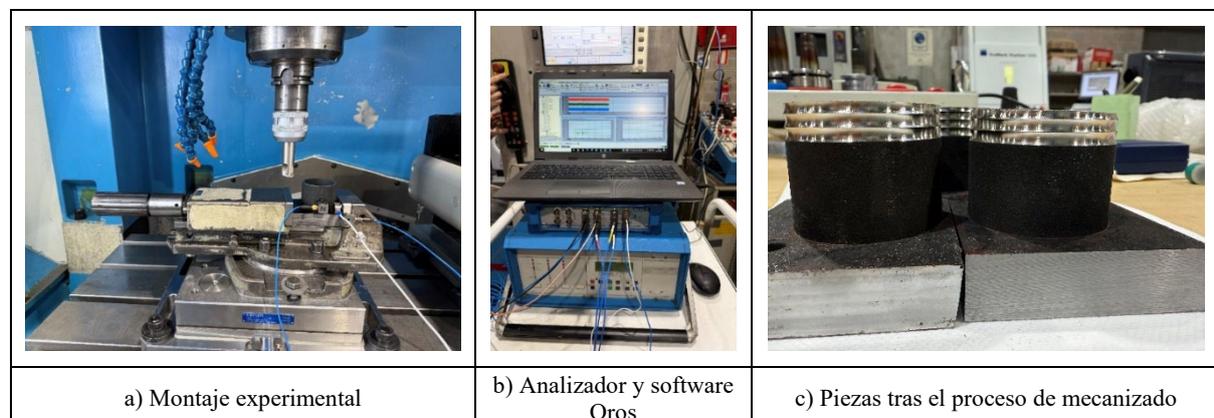


Figura 4: Montaje y piezas para análisis de fuerzas y aceleraciones durante el proceso de mecanizado.

En primer lugar, durante el proceso de mecanizado se han registrado tanto las fuerzas de corte como los valores de las aceleraciones que han tenido lugar durante el proceso de corte. Las fuerzas de corte se han medido con una mesa Kistler®9255B, y las aceleraciones se han registrado con un acelerómetro triaxial 356A02 de PCB PIEZOTRONICS®, cuya sensibilidad a 100 Hz es de 9,63 mV/g. Adicionalmente, se han colocado dos acelerómetros uniaxiales extra (modelos 355B03), cuya sensibilidad a 100 Hz es de 101,6 mV/g. Como puede verse en la Figura 4, las señales han sido analizadas con un analizador de señales y un amplificador de señales OROS. Los ensayos se han realizado en seco, sin la utilización de fluidos de corte.

5.1. Resultados fuerzas y aceleraciones durante el mecanizado

Los valores de fuerzas (Figura 5) y aceleración (Figura 6) registrados muestran la influencia de la geometría, y los parámetros de mecanizado (velocidad de corte y profundidad de pasada axial) en el comportamiento de las piezas durante el proceso de mecanizado. Así los resultados indican que:

- Influencia de la geometría de pieza

La geometría que mayores esfuerzos de corte soporta es la geometría cilíndrica cuya pared exterior es completamente sólida, no estando aligerada por canales. Esto se mantiene tanto para los esfuerzos en las tres principales direcciones F_x , F_y y F_z . Por el contrario, la geometría que menores esfuerzos soporta es aquella cuya pared está aligerada por canales a 90 grados, seguida de aquella que presenta canales a 120 grados. Es decir, las geometrías aligeradas presentan un mejor comportamiento durante el mecanizado, ya que, de alguna forma, absorben/amortiguan los esfuerzos de corte frente al comportamiento que presenta la geometría sólida.

En lo que respecta a las aceleraciones, los valores más representativos son los registrados por el acelerómetro triaxial y en concreto, las señales registradas en la dirección ‘Y’ del mismo. Sin embargo, en el caso de las aceleraciones, se muestran valores similares para las cuatro geometrías de pieza estudiadas.

- Influencia de la velocidad de corte

Los valores de fuerzas y aceleraciones muestran un comportamiento ligeramente ascendente conforme aumenta la velocidad de corte.

- Influencia de la profundidad de pasada radial

Los valores de fuerzas y aceleraciones muestran un comportamiento similar para todos los valores de profundidad de corte radial estudiados.

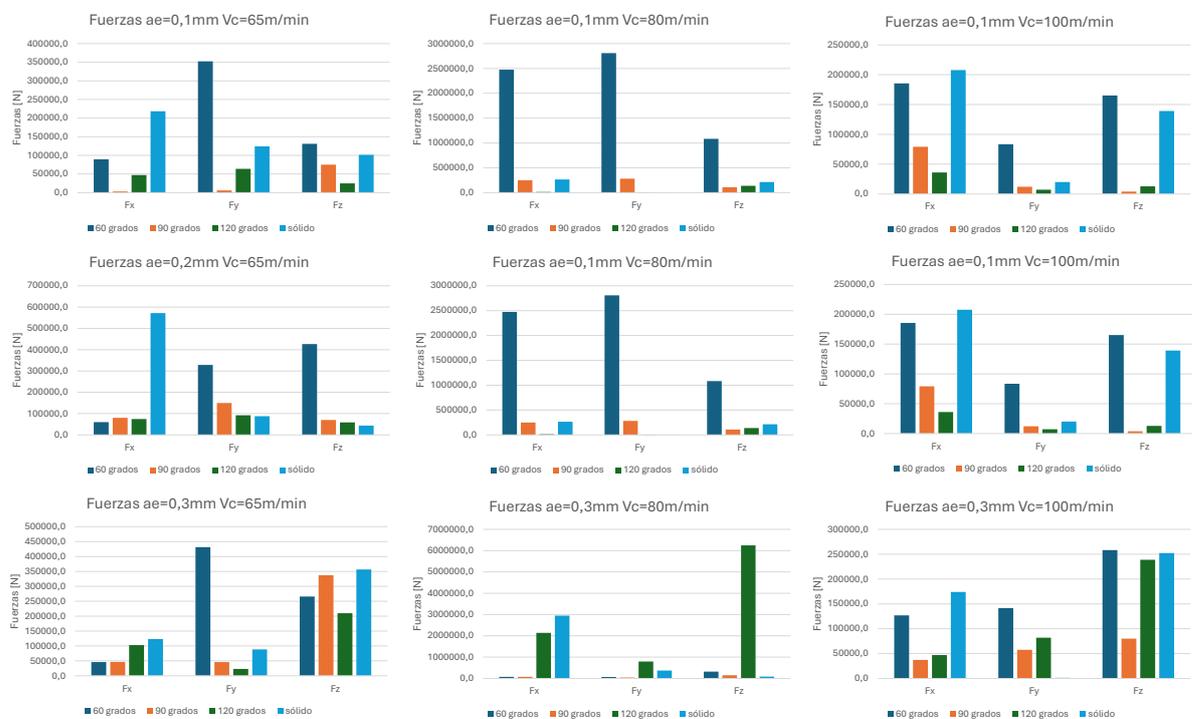


Figura 5: Fuerzas registradas durante los ensayos.

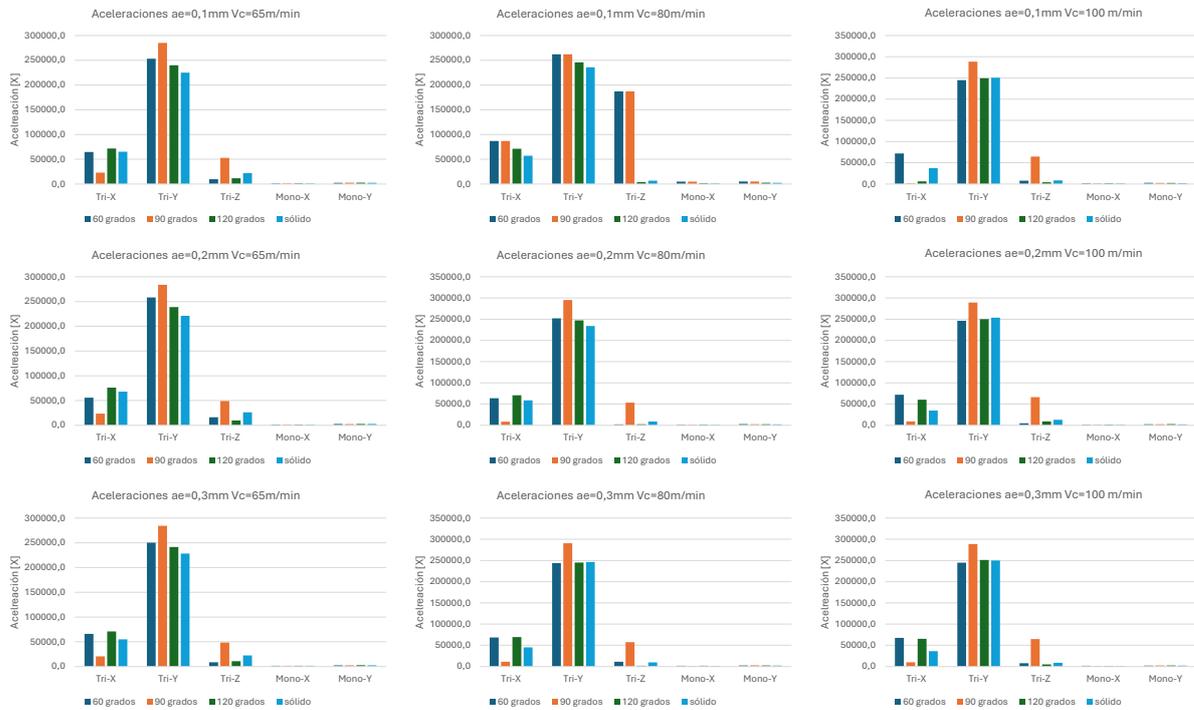


Figura 6: Aceleraciones registradas durante los ensayos.

5.2. Resultados SEM

Desde un punto de vista del proceso de fabricación y de la calidad de los elementos impresos a través de tomografía), las piezas han sido analizadas mediante SEM, como puede observarse en la Figura 7. Los resultados muestran que los canales se han fabricado con la orientación diseñada, si bien, la geometría de los canales se ha visto alterada ligeramente por las adhesiones de polvo producidas durante el propio proceso de fabricación aditiva. Los canales que aparecen ‘reellenos’ son debidos a la resina de encapsulación para la preparación de la probeta para el análisis.

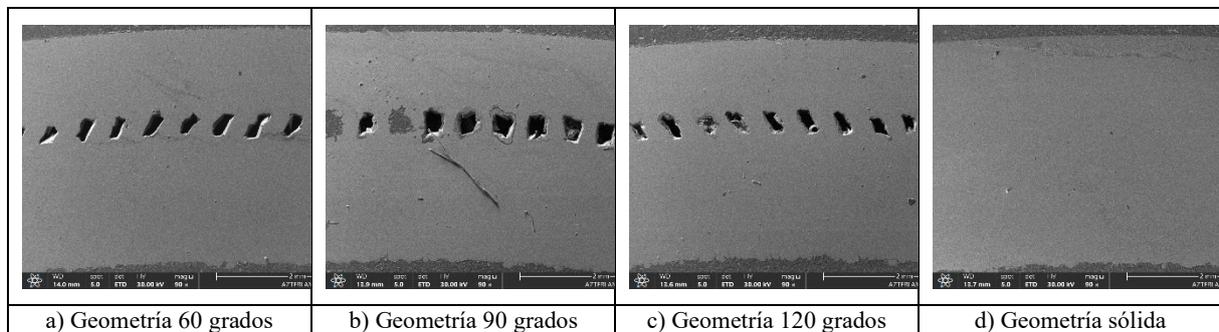


Figura 7: Análisis SEM de las geometrías de pieza a 90 aumentos.

5.3. Resultados tomografía

Con respecto al análisis tomográfico, se han analizado las geometrías mediante secciones transversales a diferentes alturas ($z=0$, $z=-15$ y $z=30$). La altura $z = 0$ se ha definido mediante un ajuste de un plano mediante mínimos cuadrados en la superficie superior de la pieza. En la Figura 8, se muestra el resultado para la geometría de pieza con canales a 60 grados. Tal y como puede observarse, cada sección muestra que se mantienen los canales a lo largo de la altura de pieza, sin embargo, se aprecian diferentes tamaños de los canales a lo largo del volumen la misma. Se ha utilizado el equipo de tomografía X-CUBE compact 225 (TRIMEK®).

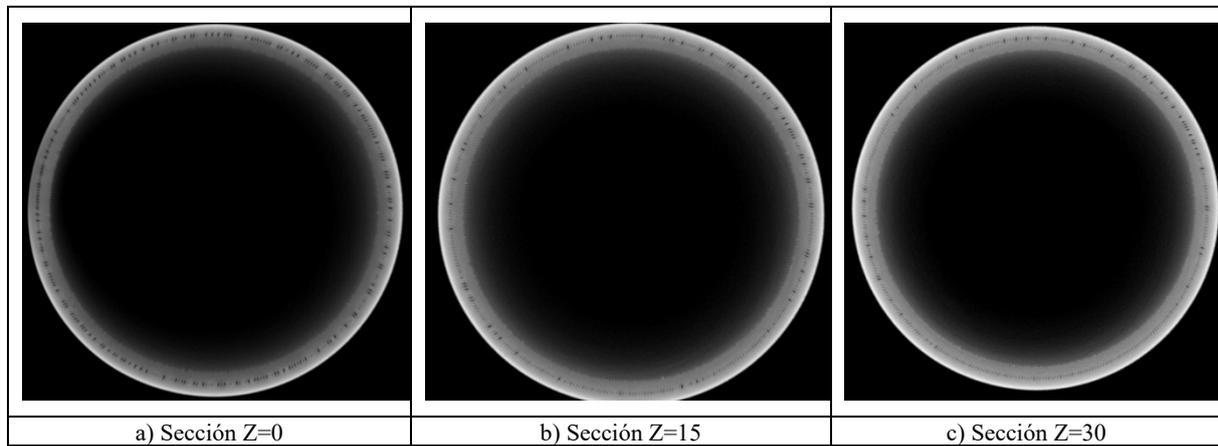


Figura 8: Análisis tomográfico de las geometrías de pieza con canales a 60 grados.

5.4. Resultados desgaste

Por otro lado, también se ha analizado el desgaste de la herramienta con el microscopio PCE-MM200 (Figura 9). Para la realización de todos los ensayos, únicamente se emplearon 3 de las plaquitas redondas, sin tener que cambiarlas debido al desgaste. El valor de este, como puede observarse en la Figura 10, fue inferior a 0,1 mm de desgaste de filo. Además, éste fue constante a lo largo de toda la zona de contacto de la plaquita con el material.

La totalidad de los ensayos tuvo una duración de alrededor de 17 minutos de mecanizado. De los cuales la mitad de ellos correspondieron a pasadas de limpieza en la que no se mecanizaba totalmente toda la superficie. Debido a las pequeñas distorsiones térmicas del proceso de SLM, que hacían que la cilindricidad no fuese perfecta.

Considerando únicamente las pasadas de acabado, la herramienta con referencia C251.20.R.03-08-A-60-RS y plaquitas RDHX 0802M0SN-F50 CTCS245 de Ceratizit® fueron capaces de remover un volumen de 1232,42 mm³. Lo que equivale también a una distancia de mecanizado de aproximadamente 6,5 m, teniendo en cuenta que era una pasada de acabado de poco espesor de viruta.

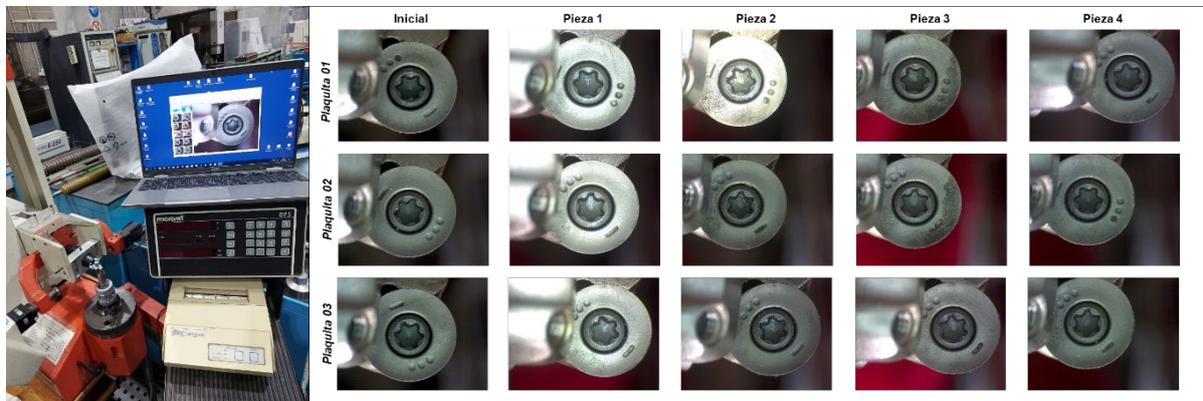
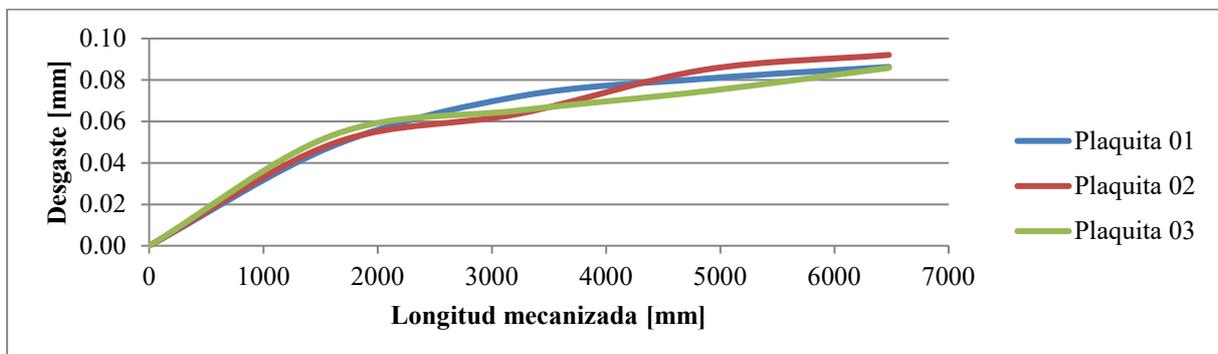


Figura 9: Izquierda) Proceso de medición del desgaste de la plaquita con PCE-MM200. Derecha) Imágenes de las plaquitas después del mecanizado de cada una de las piezas.



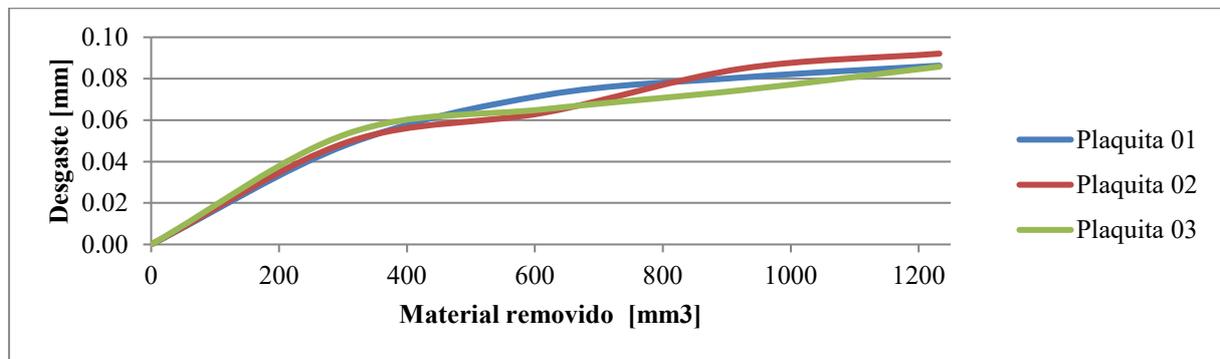


Figura 10: Arriba) Evolución del desgaste de las plaquitas en función de la longitud mecanizada. Abajo) Evolución del desgaste de las plaquitas en función del material removido.

6. Conclusiones

En lo referente al comportamiento de los diferentes diseños, se ha podido comprobar que:

- Las piezas de pared delgada PBF-LB Inconel 718 con diseños de microestructura interna se pueden fabricar garantizando su funcionalidad.
- El fresado final no daña la integridad de los diseños internos de la microestructura. No se detectan roturas, desprendimientos ni diseños fracturados bajo las cargas de mecanizado normales y tangenciales.
- Las geometrías aligeradas presentan un mejor comportamiento durante el mecanizado ya que de alguna forma absorben/amortiguan los esfuerzos de corte frente al comportamiento que presenta la geometría sólida. En el caso de las aceraciones, se muestran valores similares para las cuatro geometrías de pieza estudiadas. La orientación de la microestructura (90°) ha ofrecido las fuerzas de fresado promedio más bajas, que son coherentes con las fuerzas de corte deseables requeridas para terminar la pared exterior.
- Los valores de fuerzas y aceleraciones muestran un comportamiento similar para todos los valores de profundidad de corte radial estudiados.
- Los valores de fuerzas y aceleraciones muestran un comportamiento ligeramente ascendente conforme aumenta la velocidad de corte.
- Los canales se han fabricado con la orientación diseñada, si bien, la geometría de los canales se ha visto alterada ligeramente por las adhesiones de polvo producidas durante el propio proceso de fabricación aditiva.
- El desgaste de las plaquitas de corte fue inferior a 0,1 mm de desgaste de filo, siendo constante a lo largo de toda la zona de contacto de la plaquita con el material.

7. Agradecimientos

Los autores agradecen al Gobierno Vasco, por el apoyo a los grupos de investigación universitarios, IT1573-22, a través de la convocatoria ELKARTEK con el proyecto KK-2024/00095 financiada por el Departamento de Industria, Transición Energética y Sostenibilidad del Gobierno Vasco, y la convocatoria PUE_2024_1_0003 financiada por el Departamento de Educación del Gobierno Vasco. También agradecen a la convocatoria PID2023-146640NB-I00 financiada por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y cofinanciada por la Unión Europea. Además, esta publicación es parte del Proyecto de investigación PLEC2024-011247 financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por FEDER, UE. Por último, los autores agradecen a CERATIZ por su colaboración para la realización de este trabajo.

8. Referencias

- [1] Pan C., Han Y., Lu J., “Design and Optimization of Lattice Structures: A Review”, Applied Sciences 10(18), 6374 (2020). <https://doi.org/10.3390/app10186374>
- [2] Gibson L.J., Ashby M.F., “Cellular Solids: Structure and Properties”, Cambridge University Press, Cambridge (1991).
- [3] Bhate D., “Four Questions in Cellular Material Design”, Materials 12 (2019).
- [4] Tao W., Leu M.C., “Design of lattice structure for additive manufacturing”, Proceedings of the 2016 International Symposium on Flexible Automation Cleveland (ISFA 2016), 326–332, Cleveland, OH, USA (2016).

- [5] Li M., Benn F., Derra T., Kröger N., Zinser M., Smeets R., Molina-Aldareguia J.M., Kopp A., LLorca J., “Microstructure, mechanical properties, corrosion resistance and cytocompatibility of WE43 Mg alloy scaffolds fabricated by laser powder bed fusion for biomedical applications”, *Materials Science and Engineering: C* 119, 111623 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.111623>
- [6] Calleja-Ochoa A., Gonzalez-Barrio H., López de Lacalle L.N., Martínez S., Albizuri J., Lamikiz A., “A New Approach in the Design of Microstructured Ultralight Components to Achieve Maximum Functional Performance”, *Materials* 14, 1588 (2021).
- [7] Pan C., Han Y., Lu J., “Design and Optimization of Lattice Structures: A Review”, *Applied Sciences* 10(18), 6374 (2020).
- [8] Rupal B.S., Li X., Rajani H.R.Z., Chen Z., Qureshi A.J., “Porosity and Shape Deviation Analysis of Lattice Structures Manufactured Using Laser Powder Bed Fusion Process”, *Procedia CIRP* 114, 48-53 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.10.007>
- [9] Mishra S.K., Gómez-Escudero G., González-Barrio H., Calleja-Ochoa A., Martínez S., Barton M., Lopez de Lacalle L.N., “Machining-induced characteristics of microstructure-supported PBF-LB-INCONEL 718 curved thin walls”, *Procedia CIRP* 108, 176-181 (2022).
- [10] Markl M., Körner C., “Multiscale Modeling of Powder Bed-Based Additive Manufacturing”, *Annual Review of Materials Research* 46, 93–123 (2016). <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070115-032158>
- [11] Ambekar R.S., Kushwaha B., Sharma P., Bosia F., Fraldi M., Pugno N.M., Tiwary C.S., “Topologically engineered 3D printed architectures with superior mechanical strength”, *Materials Today* 48, 72-94 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.03.014>
- [12] Mora S., Pugno N.M., Misseroni D., “3D printed architected lattice structures by material jetting”, *Materials Today* 59, 107-132 (2022).
- [13] Pang S., et al., “Biofabrication”, *Biofabrication* 15, 025011 (2023). <https://doi.org/10.1088/1758-5090/acb387>
- [14] Pérez-Ruiz J.D., López de Lacalle L.N., Urbikain G., Pereira O., Martínez S., Bris J., “On the relationship between cutting forces and anisotropy features in the milling of PBF-LB Inconel 718 for near net shape parts”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 170 (2021).
- [15] Calleja A., Urbikain G., González H., Cerrillo I., Polvorosa R., Lamikiz A., “Inconel®718 superalloy machinability evaluation after laser cladding additive manufacturing process”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 97, 2873–2885 (2018).
- [16] Perez-Ruiz J.D., Martinez-Rodriguez S., Lopez-De La Calle Marcaide L.N., Lamikiz-Mentxaka A., Gonzalez-Barrio H., Pereira-Neto O., “A robust process for the precision finishing of pieces originated by metallic printing”, *DYNA* 95(4), 436-442 (2020).