



Acabado de agujeros en piezas impresas de Inconel 718 fabricadas por PBF-LB mediante fresado helicoidal

Gaizka Gómez Escudero¹, Maialen Martínez de Aguirre Ochoa de Retana², Haizea González Barrio², Amaia Calleja Ochoa²

¹ Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad del País Vasco UPV/EHU, Escuela de Ingeniería de Bilbao, gaizka.gomez@ehu.eus

² Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad del País Vasco UPV/EHU, Escuela de Ingeniería de Vitoria-Gasteiz, maialen.martinezdeaguirre@ehu.eus, haizea.gonzalez@ehu.eus, amaia.calleja@ehu.eus

La fabricación aditiva mediante fusión láser por lecho de polvo (PBF-LB) se ha consolidado como un proceso clave en la industria manufacturera, a pesar de que el mecanizado sigue siendo esencial para mejorar la calidad de las piezas. En particular, los agujeros impresos en piezas de fabricación aditiva suelen presentar baja precisión, y el fresado helicoidal aparece como alternativa a los procesos convencionales como el escariado o taladrado convencional para mejorar estos acabados en componentes metálicos. El Inconel 718, ampliamente utilizado en piezas de motores aeroespaciales debido a sus excelentes propiedades, exige una alta fiabilidad. Sin embargo, su tendencia al endurecimiento durante el mecanizado lo clasifica como un material difícil de trabajar. Este estudio se centra en la mejora de la calidad de los agujeros en piezas de Inconel 718 producidas por PBF-LB mediante el fresado helicoidal. Se fabricaron piezas con agujeros previos a través de PBF-LB, los cuales se acabaron mediante fresado helicoidal. Los agujeros impresos en las piezas de PBF-LB mostraban un error geométrico significativo. Los resultados indicaron que el fresado helicoidal es efectivo para mejorar la calidad de los agujeros. Las piezas producidas con un ángulo de escaneo láser de 67° y sometidas a tratamiento térmico presentaron un mayor refinamiento de granos y formación de precipitados, lo que resultó en mayores fuerzas de corte y rugosidad. Se observó una correlación significativa entre los patrones de fuerza de corte y la variación del error geométrico. El modelado del proceso permitió identificar los parámetros de PBF-LB y fresado helicoidal más influyentes en las fuerzas de corte y en la rugosidad. Los avances axial y tangencial mostraron efectos proporcionales e inversamente proporcionales, respectivamente, sobre las fuerzas de corte, de acuerdo con la cinemática y el volumen de viruta no deformada. Por último, se llevó a cabo una optimización para determinar las mejores condiciones que permitan mejorar la rugosidad y reducir las fuerzas de corte.

1. Introducción

La fabricación aditiva mediante fusión láser por lecho de polvo (PBF-LB) ha transformado la industria manufacturera, proporcionando una solución eficaz para la producción de piezas complejas y ligeras con un alto nivel de personalización. Este proceso, que utiliza un láser para fundir capas sucesivas de polvo metálico, permite la creación de geometrías imposibles de lograr con métodos de fabricación tradicionales [1]. A pesar de sus ventajas, como la reducción de peso en componentes y la capacidad de producir formas complejas [2], este método presenta limitaciones significativas en cuanto a la calidad superficial y precisión dimensional de las piezas, lo que hace necesario recurrir a procesos de postacabado [3].

Uno de los principales retos que presentan las piezas fabricadas mediante PBF-LB es la calidad de los agujeros impresos. Estos suelen presentar baja precisión geométrica y dimensional debido a las características del proceso, como la solidificación rápida, las tensiones térmicas generadas y los defectos derivados de la estrategia de escaneo [4]. Estos errores geométricos pueden afectar directamente el rendimiento y la funcionalidad de las piezas, especialmente en aplicaciones críticas como las aeroespaciales. Por esta razón, los procesos de mecanizado, como el fresado helicoidal, son esenciales para mejorar la calidad de los agujeros. Esta técnica permite realizar trayectorias helicoidales controladas con herramientas de corte, logrando mejorar tanto la rugosidad superficial como la redondez de los agujeros [5].

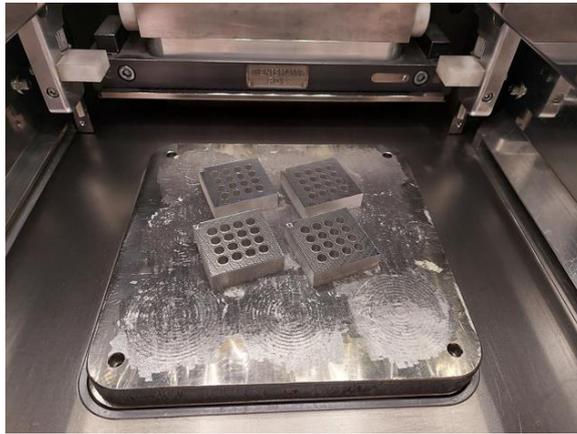
El Inconel 718, una aleación base níquel ampliamente utilizada en la industria aeroespacial y de turbinas, se destaca por sus excelentes propiedades mecánicas, tales como resistencia a la corrosión, fatiga y altas temperaturas [6]. Estas propiedades hacen que sea una opción preferida para componentes sometidos a condiciones extremas. Sin embargo, este material se clasifica como difícil de mecanizar debido a su alta dureza, su capacidad de endurecimiento durante el mecanizado y la tendencia a generar altas fuerzas de corte [7]. A pesar de estas dificultades, la implementación de tratamientos térmicos en las piezas fabricadas por PBF-LB puede mejorar sus propiedades mecánicas al inducir la formación de fases de precipitados como γ' y γ'' , que incrementan la resistencia del material, aunque también aumentan la complejidad del mecanizado [8].

El ángulo de escaneo láser es otro factor crítico que afecta directamente la microestructura y propiedades de las piezas fabricadas [9]. Un escaneo lineal a 0° produce granos columnares más grandes y orientados en una sola dirección, mientras que un escaneo inclinado con ángulos rotados capa a capa genera una microestructura más refinada y policristalina, lo que impacta tanto la resistencia mecánica como el comportamiento durante el mecanizado [10]. Comprender cómo estas estrategias de fabricación influyen en el acabado superficial y en las fuerzas de corte es esencial para optimizar los procesos de acabado y mejorar el rendimiento de los componentes fabricados [11,12].

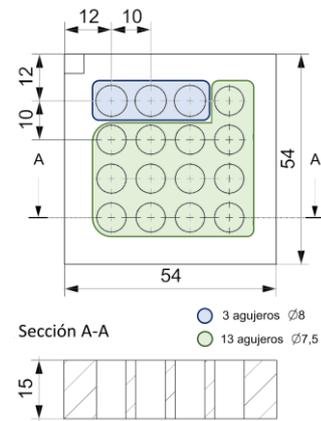
Este trabajo se centra en la evaluación de la efectividad del fresado helicoidal para mejorar la calidad de los agujeros en piezas de Inconel 718 fabricadas mediante PBF-LB. Se investigan los efectos del ángulo de escaneo láser y del tratamiento térmico sobre las fuerzas de corte, la rugosidad superficial y la precisión geométrica, con el objetivo de proporcionar información clave para la optimización del proceso de acabado en componentes metálicos de alta exigencia técnica.

2. Diseño experimental

Para llevar a cabo el estudio, se fabricaron piezas de Inconel 718 utilizando el proceso de fabricación aditiva PBF-LB, empleando para ello una máquina Renishaw AM400. Las piezas impresas tienen unas dimensiones de $54 \times 54 \times 15$ mm y los agujeros impresos en ellas tienen un diámetro de 7,5 mm, como se puede ver en los planos de la Figura 1. Las piezas se fabricaron con agujeros previamente impresos, los cuales fueron sometidos a un proceso de fresado helicoidal para su acabado, ampliándolos hasta un diámetro de 8 mm, salvo 3 de los 16 agujeros, que ya fueron impresos con las medidas finales a modo de referencia.



(a) Piezas fabricadas sobre base de impresión en la RenAM 400



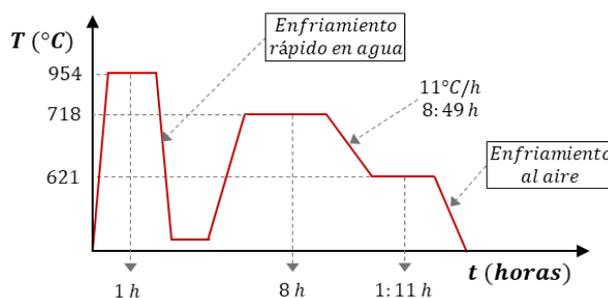
(b) Dimensiones de las piezas

Figura 1: Piezas test para los ensayos de fresado helicoidal.

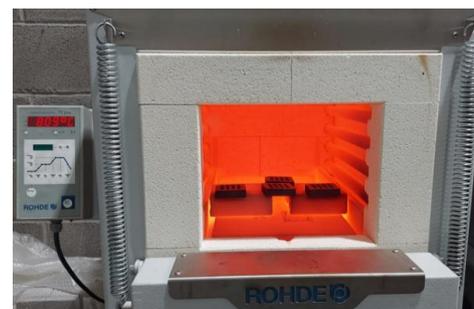
Se consideraron cuatro configuraciones de material, obtenidas variando dos parámetros: el ángulo de escaneo láser, siendo este la variación de la orientación del haz láser con respecto a la superficie de la capa de polvo que está siendo sinterizada con respecto a la anterior capa y; el tratamiento térmico aplicado, o no, dependiendo del caso de estudio. El ángulo de escaneo láser se ajustó a dos niveles: 0° (denotado como R0) y 67° (denotado como R67). El tratamiento térmico, por otro lado, se aplicó en algunas de las muestras con el fin de modificar sus propiedades mecánicas.

La configuración R0, con un ángulo de escaneo de 0° , produce una microestructura laminar y, en algunos casos pudiendo llegar a una estructura monocristalina, la cual está caracterizada por un tamaño de grano mayor y un índice de textura más alto. En cambio, la estrategia R67 da lugar a una microestructura policristalina, con un refinamiento de grano más fino y un índice de textura más bajo. Estas diferencias en la microestructura influyen directamente en la resistencia al corte y en el comportamiento del material durante el mecanizado [7].

El tratamiento térmico consistió en el tratamiento térmico N07718 según la norma ASTM B637-06, “*Standard Specification for Precipitation-Hardening Nickel Alloy Bars, Forgings, and Forging Stock for High-Temperature Service*”, el cual consiste en un tratamiento de recocido y uno de precipitado posterior. Este tratamiento comenzó con un ciclo de calentamiento a 954°C durante una hora, seguido de un enfriamiento rápido en agua. Posteriormente, se calentaron las piezas a 718°C durante ocho horas, con un enfriamiento en horno a 621°C con una tasa de enfriamiento de 11°C/h . Finalmente, se mantuvo la temperatura de 621°C durante una hora y once minutos, para después dejar que las piezas se enfriaran al aire. Este ciclo se muestra en la Figura 2.



(a) Representación gráfica del tratamiento térmico N07718



(b) Probetas en el horno de inducción después del proceso de precipitado antes del enfriamiento en agua

Figura 2: Tratamiento térmico aplicado a las piezas test.

El fresado helicoidal se realizó en un centro de mecanizado de tres ejes Kondia® A6, con una velocidad máxima de rotación del husillo de 12.000 rpm y una potencia de 15 kW. Se utilizó una fresa plana OSG® 8529250 NEO-PHS de carburo sinterizado S19, con recubrimiento TiAlN, de diámetro de corte de 5 mm, longitud de corte de 50 mm y ángulo de hélice de $36-39^\circ$, con 4 filos. Los avances axiales y tangenciales se ajustaron en tres niveles: 0,5, 0,75 y $1 \mu\text{m/diente}$ para el avance axial (f_{za}), y 15, 20 y $25 \mu\text{m/diente}$ para el avance tangencial (f_{zt}).

El diseño experimental utilizado para realizar el análisis del fresado helicoidal sobre el acabado de agujeros impresos de Inconel 718 fue un diseño factorial de 3^2 , lo que resultó en un total de 9 ensayos. Además, se realizaron 4 experimentos adicionales utilizando un diseño de proyección máxima, dando lugar a un total de 13 ensayos por

cada probeta. Los detalles de los parámetros utilizados en la fabricación de las piezas de Inconel 718 y los experimentos de fresado helicoidal se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros fijos y variables del proceso.

Parámetros fijos del proceso		
PBF-LB		
<i>Hatch distance</i>	μm	80
Altura de capa	μm	60
Potencia del láser	W	200
Velocidad de escaneo	mm/s	1250
Gas inerte	-	Argón
Parámetros fijos del proceso		
Fresado Helicoidal		
Velocidad de corte	m/min	50
Parámetros variables del proceso		
PBF-LB		
Ángulo de escaneo láser	$^{\circ}$	0 – 67
Tratamiento térmico	-	Sí – No
Parámetros variables del proceso		
Fresado Helicoidal		
Avance axial, f_{za}	$\mu\text{m}/\text{diente}$	0,5 – 0,75 – 1,0
Avance tangencial, f_{zt}	$\mu\text{m}/\text{diente}$	15 – 20 – 25

Para la evaluación de la circularidad, se utilizó una Máquina de Medición por Coordenadas (MMC) Mitutoyo Crysta-Apex C162012 equipada con la sonda REVO de Renishaw, la cual permite realizar mediciones mediante palpado continuo. Se aplicó el método del círculo de mínimos cuadrados para determinar la desviación de redondez. La resolución del equipo es de 0,0001 mm (0,1 μm) y se llevó a cabo una calibración previa utilizando una esfera patrón. La incertidumbre expandida de la medida se estimó considerando las especificaciones del equipo y las condiciones ambientales. Las fuerzas de corte durante el fresado helicoidal fueron monitorizadas utilizando un dinamómetro piezoeléctrico Kistler® 9255B.

3. Resultados

3.1. Precisión Geométrica: Redondez y Desviación Dimensional

En cuanto a la precisión geométrica de los agujeros, se observó que el fresado helicoidal resultó ser una técnica efectiva para mejorar tanto la redondez como la desviación dimensional de los agujeros impresos en las piezas de Inconel 718. Las mediciones de redondez realizadas antes y después del proceso de fresado mostraron una reducción promedio de 26,13 μm en la redondez de los agujeros, véase la Figura 3, lo que evidenció una mejora significativa en la forma geométrica de los mismos. Este resultado fue consistente en todas las configuraciones de material, independientemente de si se había aplicado tratamiento térmico o del ángulo de escaneo láser utilizado. La mejora en la redondez se debe, en gran parte, a la capacidad del fresado helicoidal para realizar un acabado más fino y preciso en los agujeros, eliminando las irregularidades presentes en las superficies internas de los agujeros tras la fabricación aditiva.

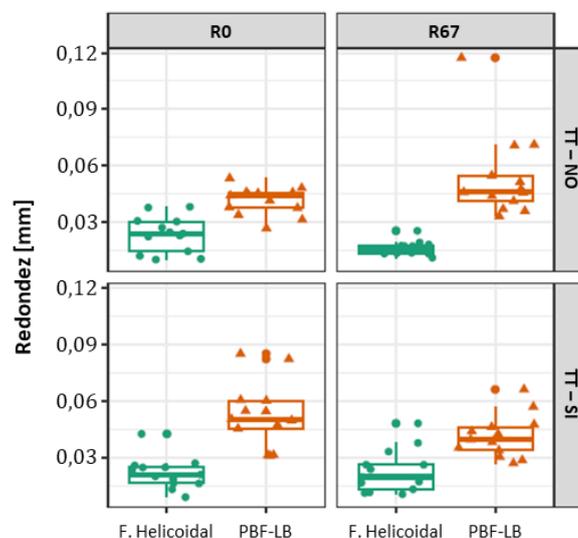


Figura 3: Resultados de redondez de los ensayos.

Las mediciones de desviación dimensional de los agujeros mostraron que las piezas fabricadas por PBF-LB sin fresado helicoidal presentaban una alta variabilidad en el diámetro de los agujeros, lo que podría generar dificultades en aplicaciones que requieren tolerancias estrictas. Sin embargo, el proceso de fresado helicoidal permitió reducir esta variabilidad, obteniendo agujeros con diámetros más consistentes y con una desviación constante de alrededor de los 20 μm de valor. Esto se observó en las mediciones realizadas con la máquina de medición por coordenadas Mitutoyo® Crysta Apex S 9106, que se muestra en la Figura 4.

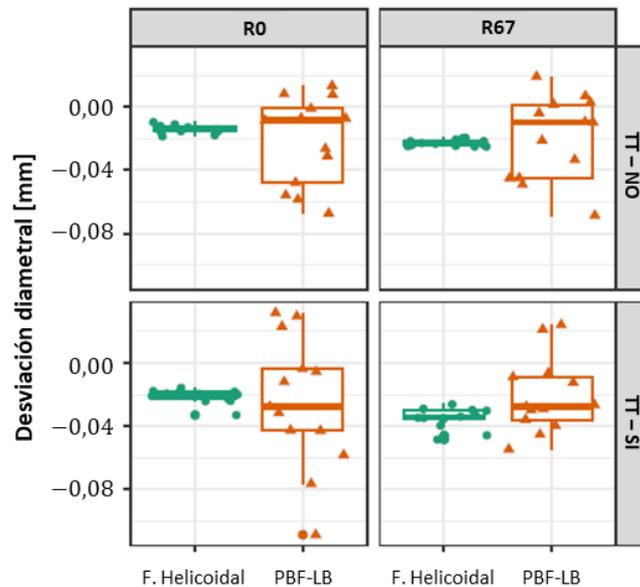


Figura 4: Resultados de desviación diametral de los ensayos.

En la Figura 5, se muestra la variación en la redondez de los agujeros antes y después del fresado, para el caso concreto de los agujeros R67 sin tratamiento térmico, donde se puede observar cómo el fresado helicoidal contribuye de manera significativa a mejorar la redondez. Aunque no se encontró una diferencia estadísticamente significativa en cuanto al efecto del ángulo de escaneo o el tratamiento térmico sobre la redondez, el fresado helicoidal consistentemente mejoró la geometría de los agujeros, mostrando su eficacia en la corrección de errores geométricos derivados del proceso de PBF-LB.

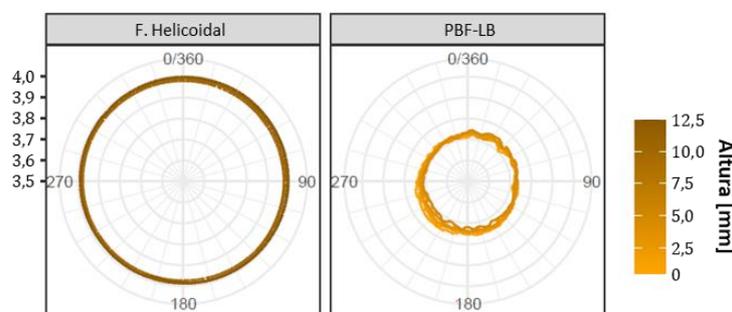


Figura 5: Representación gráfica de la desviación diametral de los agujeros R67 sin tratamiento térmico antes (figura de la derecha) y después (figura de la izquierda) de los acabados mediante fresado helicoidal.

3.2. Fuerzas de Corte

El análisis de las fuerzas de corte durante el fresado helicoidal reveló que el refinamiento de grano y la formación de precipitados, características de las muestras fabricadas con el ángulo de escaneo de 67° y tratamiento térmico, incrementaron las fuerzas de corte. Las componentes radiales (F_r) y tangenciales (F_t) de la fuerza fueron monitoreadas para comprender cómo la variabilidad en la microestructura influía en el comportamiento del material durante el fresado. Los resultados indicaron que las muestras R67, especialmente aquellas tratadas térmicamente, presentaron las fuerzas de corte más altas debido a su mayor resistencia al corte, atribuida a la mayor densidad de dislocaciones y la presencia de fases de precipitados como γ' y γ'' .

En la Figura 6 se muestran los patrones de las fuerzas de corte para las muestras R0 y R67, respectivamente. Se observó que las fuerzas de corte eran más altas en las configuraciones con tratamiento térmico, lo que es consistente con la mayor resistencia del material al corte. Estos resultados fueron coherentes con las mediciones de diámetro y redondez de los agujeros, donde las configuraciones con mayor resistencia al corte presentaron un mejor rendimiento en términos de precisión dimensional y calidad superficial, aunque requerían mayores esfuerzos de corte.

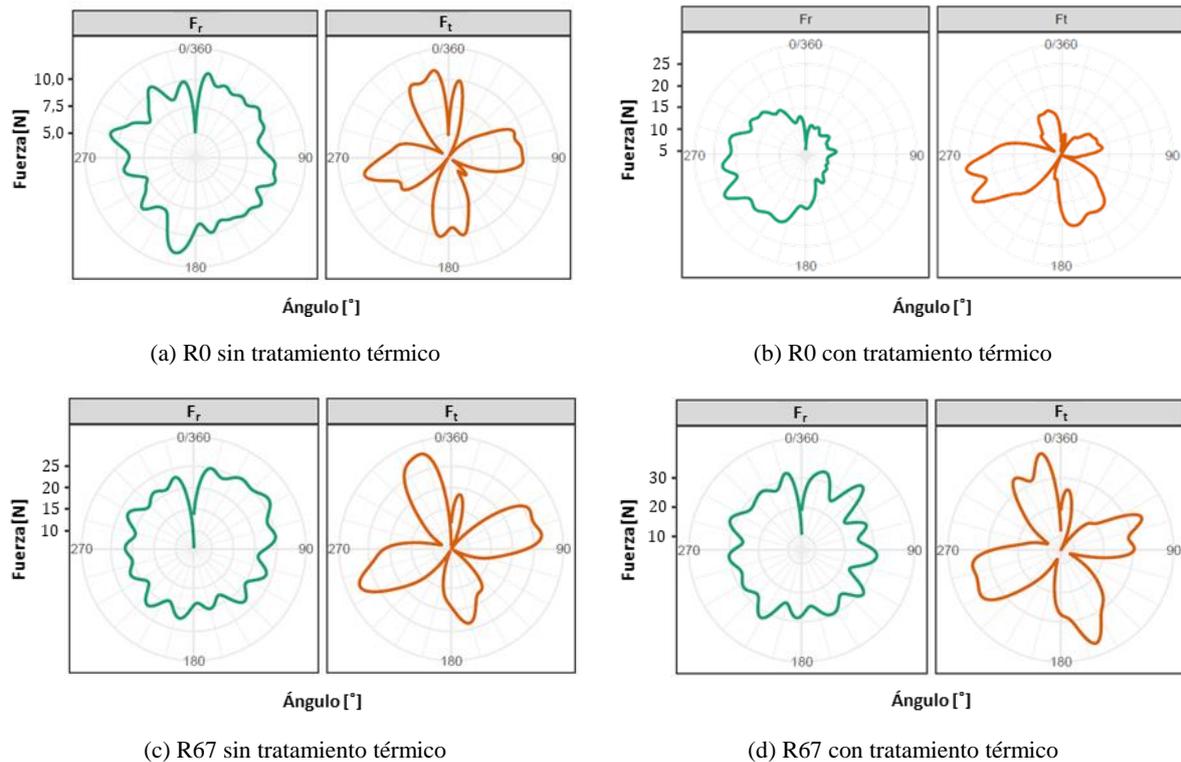


Figura 6: Patrones de fuerzas radiales (F_r) y tangenciales (F_t) de los ensayos.

La variación en las fuerzas de corte también estuvo influenciada por la geometría inicial de los agujeros, como se observó en las mediciones de diámetro y redondez. Las fuerzas de corte fueron mayores en las regiones de los agujeros donde el volumen de material a remover era más grande, lo que resultó en mayores esfuerzos radiales y tangenciales en las zonas más profundas de los agujeros. Este comportamiento fue más pronunciado en las muestras R67 con tratamiento térmico, que presentaron una mayor cantidad de material a remover debido a la formación de precipitados y un mayor tamaño de grano.

3.3. Rugosidad Superficial

En cuanto a la rugosidad superficial, se midió la Rugosidad Media Aritmética (R_a), en donde se observó que las configuraciones de material con mayor tamaño de grano, como las obtenidas con el escaneo a 0° , tendieron a tener una rugosidad superficial más baja. En contraste, las piezas con un refinamiento de grano más fino, como las obtenidas con el escaneo a 67° , mostraron una mayor rugosidad superficial, lo que se puede atribuir a la mayor resistencia al corte que generó mayor elasticidad y deformación en la herramienta y la pieza.

Los resultados mostraron que la rugosidad superficial promedio fue mayor para las muestras R67 con tratamiento térmico, donde las fuerzas de corte también fueron más altas. La Figura 7 muestra la relación entre los parámetros del proceso y la rugosidad superficial, destacando la importancia del ángulo de escaneo en la formación de la rugosidad, seguido por los avances axiales y tangenciales. Aunque las piezas tratadas térmicamente mostraron una mayor rugosidad, los mejores resultados de rugosidad superficial (R_a más bajo) se obtuvieron con la configuración R0 sin tratamiento térmico, lo que se atribuye a la menor resistencia del material en esta configuración.

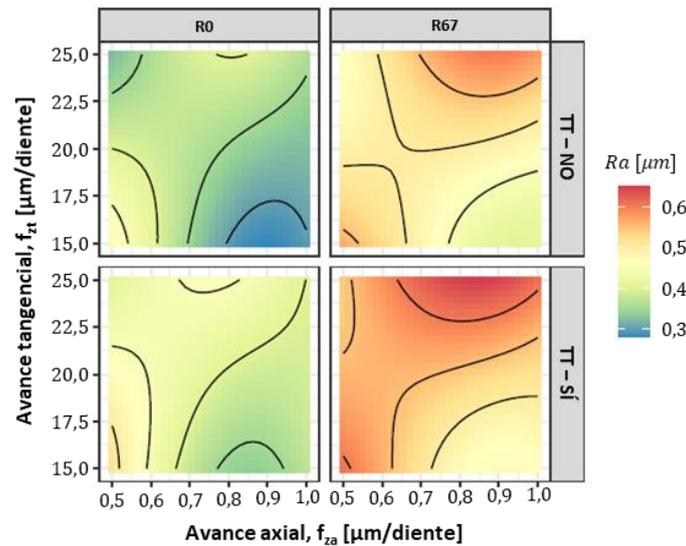


Figura 7: Grafica de rugosidad superficial en relación a los parámetros de los ensayos.

En general, el fresado helicoidal permitió obtener agujeros con una mayor precisión geométrica y dimensional. Aunque las fuerzas de corte y la rugosidad fueron mayores para las muestras con mayor refinamiento de grano, el proceso resultó ser eficaz para mejorar la calidad superficial y la forma geométrica de los agujeros impresos.

4. Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio muestran una clara relación entre los parámetros del proceso de fabricación aditiva y los efectos del fresado helicoidal en las piezas de Inconel 718. En primer lugar, se ha demostrado que el fresado helicoidal es una técnica eficaz para mejorar la calidad de los agujeros en piezas fabricadas mediante PBF-LB. La mejora en la redondez y precisión dimensional observada en los agujeros fresados, especialmente en comparación con los agujeros impresos, confirma que este proceso es adecuado para corregir los errores geométricos inherentes al proceso de fabricación aditiva.

El análisis de las fuerzas de corte reveló que el material, en particular su microestructura, juega un papel fundamental en el comportamiento durante el fresado helicoidal. Las muestras fabricadas con el ángulo de escaneo de 67° y tratamiento térmico, que presentaban un mayor refinamiento de grano y la formación de precipitados, requirieron mayores fuerzas de corte. Este comportamiento se debe al aumento de la resistencia al corte asociado con un mayor contenido de dislocaciones y fases de precipitados como γ' y γ'' , que dificultan el deslizamiento de las dislocaciones y aumentan la dureza del material. Esto es consistente con estudios previos que han observado que la presencia de precipitados en aleaciones de base níquel como el Inconel 718 mejora sus propiedades mecánicas, pero a su vez incrementa la dificultad del mecanizado [4], [6] o [9].

La relación entre las fuerzas de corte y la geometría de los agujeros fue también significativa. Las regiones de los agujeros con mayor material a remover generaron mayores fuerzas de corte, lo que resalta la importancia de la precisión geométrica de los agujeros previos al fresado. Este hallazgo sugiere que una mayor precisión en la fabricación aditiva, especialmente en la geometría de los agujeros, puede reducir las fuerzas de corte necesarias, lo que optimiza la eficiencia del proceso de fresado helicoidal.

En cuanto a la rugosidad superficial, se observó que las muestras con mayor refinamiento de grano y precipitados, como las de escaneo a 67° con tratamiento térmico, tendieron a presentar una mayor rugosidad. Esto se debe a la mayor resistencia del material, que genera mayores esfuerzos de corte y, por lo tanto, una mayor elasticidad y deformación de la herramienta y la pieza. Este comportamiento es consistente con estudios que indican que los materiales más duros y resistentes, como el Inconel 718, tienden a generar superficies más rugosas durante el mecanizado debido a la mayor cantidad de energía requerida para el corte [8]. Sin embargo, las piezas fabricadas con el escaneo a 0° sin tratamiento térmico mostraron una rugosidad más baja, lo que sugiere que la resistencia al corte en estas configuraciones fue menor, lo que permitió obtener una superficie más lisa con un menor esfuerzo de corte.

Un aspecto interesante observado fue la variabilidad en la geometría de los agujeros fabricados por PBF-LB. A pesar de que se utilizó el mismo diseño de impresión para todas las piezas, los agujeros presentaron diferentes grados de ovalización, lo que refleja la naturaleza impredecible de la fabricación aditiva. Esta variabilidad, que no estuvo relacionada con el ángulo de escaneo o el tratamiento térmico, puede atribuirse a factores como la distribución desigual del material durante la impresión o las tensiones térmicas generadas durante el proceso de fabricación. El fresado helicoidal demostró ser una solución efectiva para corregir esta variabilidad, mejorando la

redondez y reduciendo los errores geométricos de los agujeros, independientemente de la configuración de material.

En términos de optimización, los resultados sugieren que, para obtener los mejores acabados superficiales, es recomendable utilizar configuraciones de material con un mayor tamaño de grano, como las obtenidas con el ángulo de escaneo a 0° , sin tratamiento térmico. Sin embargo, para mejorar la precisión dimensional y reducir las fuerzas de corte, se recomienda el uso de configuraciones con un mayor refinamiento de grano, como las obtenidas con el escaneo a 67° y tratamiento térmico. Estos hallazgos refuerzan la importancia de controlar tanto los parámetros del proceso de fabricación aditiva como los del fresado helicoidal para alcanzar un equilibrio entre las propiedades mecánicas, la calidad superficial y las fuerzas de corte.

En resumen, el fresado helicoidal demostró ser una solución viable y efectiva para mejorar la calidad de los agujeros en piezas fabricadas por PBF-LB, permitiendo la corrección de errores geométricos y mejorando la precisión dimensional. Sin embargo, el comportamiento del material y las variaciones en la geometría inicial de los agujeros deben ser cuidadosamente controlados para optimizar las fuerzas de corte y la rugosidad superficial, lo que permitirá una mayor eficiencia en el proceso de mecanizado.

5. Conclusiones

Este estudio ha evaluado la efectividad del fresado helicoidal para mejorar la calidad de los agujeros en piezas de Inconel 718 fabricadas mediante el proceso de fabricación aditiva PBF-LB. Las principales conclusiones de este trabajo pueden resumirse como:

- **Mejora en la precisión geométrica:** El fresado helicoidal ha demostrado ser una técnica efectiva para mejorar la geometría de los agujeros en piezas fabricadas por PBF-LB. Las mediciones de redondez mostraron una mejora significativa en la precisión de los agujeros, con una reducción promedio de $26,13 \mu\text{m}$ en la redondez, lo que sugiere que el fresado helicoidal puede corregir los errores geométricos inherentes al proceso de fabricación aditiva.
- **Influencia de la microestructura en las fuerzas de corte:** El análisis de las fuerzas de corte reveló que las muestras con mayor refinamiento de grano y formación de precipitados, como las obtenidas con el escaneo a 67° y tratamiento térmico, requirieron mayores fuerzas de corte. Esto se debe a la mayor resistencia del material, que dificulta el proceso de corte.
- **Rugosidad superficial:** Se observó que la rugosidad superficial fue mayor en las configuraciones de material con mayor refinamiento de grano, lo que se atribuye a las mayores fuerzas de corte y la mayor elasticidad del material. Sin embargo, las configuraciones con mayor tamaño de grano, como las obtenidas con el escaneo a 0° sin tratamiento térmico, mostraron una rugosidad más baja, lo que indica que una menor resistencia al corte favorece un acabado superficial más bajo.
- **Optimización del proceso:** Los resultados sugieren que, para obtener un buen equilibrio entre calidad superficial y precisión dimensional, es importante optimizar los parámetros del proceso de fabricación aditiva y del fresado helicoidal. Las configuraciones con un mayor tamaño de grano (escaneo a 0° sin tratamiento térmico) producen mejores resultados en términos de rugosidad, mientras que las configuraciones con mayor refinamiento de grano (escaneo a 67° con tratamiento térmico) ofrecen mejores resultados en términos de precisión dimensional y reducción de fuerzas de corte.

En conclusión, el fresado helicoidal es un proceso efectivo para mejorar la calidad de los agujeros en piezas de Inconel 718 fabricadas por PBF-LB, corrigiendo errores geométricos y mejorando la precisión dimensional. Sin embargo, el comportamiento del material y la geometría inicial de los agujeros deben ser cuidadosamente considerados para optimizar el proceso, reducir las fuerzas de corte y obtener el mejor acabado superficial. Los hallazgos de este estudio proporcionan información valiosa para la mejora de los procesos de mecanizado en componentes de alta exigencia mecánica, como los utilizados en la industria aeroespacial.

6. Referencias

- [1] Pérez-Ruiz J., González-Barrio H., Sanz-Calle M., Gómez-Escudero G. Munoa J. López de Lacalle L.N. “Machining stability improvement in LPBF printed components through stiffening by crystallographic texture control”, *CIRP Annals* **72(1)**, 141144 (2023).
- [2] Denkena B., Boehnke D., Dege J.H. “Helical milling of CFRP–Titanium layer compounds” *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* **1(2)**, 6469 (2008).
- [3] Boban J, Ahmed A. “Defect mitigation and surface enhancement of additively manufactured alsi10mg internal features using electro-thermal post-treatment” *Materials Letters* **353**, 135267 (2023).
- [4] Wang M., Xie D., Zhou K., Jia X., Jiang R., Shen L., Tian Z., Zhao J. “Tailored microstructure by using in-situ re-scanning and its influence on fatigue crack growth behavior of Inconel 718 fabricated by LPBF at elevated temperature” *International Journal of Fatigue* **176**, 107865 (2023).
- [5] Rodrigues V.F.S., Ferreira J.R., de Paiva A.P., de Souza L.G.P., Pereira R.B.D., Brandao L.C. “Robust modeling and optimization of borehole enlarging by helical milling of aluminum alloy Al7075” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **100**, 25832599 (2019).
- [6] De Bartolomeis A., Newman S.T., Jawahir I., Biermann D., Shokrani A. “Future research directions in the machining of Inconel 718” *Journal of Materials Processing Technology* **297**, 117260 (2021).
- [7] Pérez-Ruiz J.D., de Lacalle L.N.L., Urbikain G., Pereira O., Martínez S., Bris J. “On the relationship between cutting forces and anisotropy features in the milling of LPBF Inconel 718 for near net shape parts”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* **170**, 103801 (2021).
- [8] Meng G., Gong Y., Zhang J., Ren Q., Zhao J. “Microstructure effect on the machinability behavior of additive and conventionally manufactured Inconel 718 alloys” *Journal of Materials Processing Technology* **324**, 118228 (2024).
- [9] Wan H.Y., Zhou Z.J., Li C.P., Chen G.F., Zhang G.P. “Effect of scanning strategies on microstructure and mechanical properties of selective laser melted Inconel 718” *Materials Science and Engineering: A* **761**, 4248 (2019).
- [10] Trosch T., Strossner J., Volkl R., Glatzel U. “Microstructure and mechanical properties of selective laser melted Inconel 718 compared to forging and casting” *Material Letters* **164**, 428431 (2016).
- [11] Liu, S., Li, H., Qin, C., Zong R., Fang X.Y. “The effect of energy density on texture and mechanical anisotropy in selective laser melted Inconel 718” *Materials & Design* **191**, 108642 (2020).
- [12] Pérez-Ruiz J.D., Galbusera F., Caprio L., Previtali B., López de Lacalle L.N., Lamikiz A., Demir A.G. “Laser beam shaping facilitates tailoring the mechanical properties of Inconel 718 during powder bed fusion” *Journal of Materials Processing Technology* **328**, 118393 (2024).