



Análisis experimental del mecanizado de PEEK mediante herramienta impresa

I. Calvo¹, A. Díaz-Álvarez¹, M. Fernández-Torrijos², H. Miguélez¹, A. Saez

¹ Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid, Avda de la Universidad 30, 28911, Leganés, Madrid, España. illan.calvo@gmail.com; andiaz@ing.uc3m.es; mhmiguel@ing.uc3m.es; alsaeza@pa.uc3m.es

² Departamento Ingeniería Térmica y de Fluidos, Universidad Carlos III de Madrid, Avda de la Universidad 30, 28911, Leganés, Madrid, España. ftorrijo@ing.uc3m.es

La industria de la fabricación se encuentra en constante evolución. Hasta la fecha, casi cualquier elemento fabricado en metal se ha obtenido a través de mecanizado mediante el empleo de plaquitas de corte. Es por ello, que estas herramientas deben soportar elevadas temperaturas y fuerzas extremas, siendo necesario que para su fabricación se empleen materiales de elevada dureza y tenacidad. Así pues, uno de los principales desafíos científicos y tecnológicos dentro del sector de la fabricación es el desarrollo de herramientas que sean capaces de soportar las elevadas temperaturas que se crean en la superficie de contacto entre la herramienta y la pieza a mecanizar, las cuales, suponen una reducción drástica de la vida útil de la misma.

En la actualidad, la fabricación de plaquitas de corte mediante procesos mecánicos más tradicionales (prensado, torneado, fresado y pulvimetalurgia entre otros...) suponen unos costes elevados. En la fabricación de motores, los costes de mecanizado se estiman en un 35% del coste total de fabricación del componente. Es por ello que, en la actualidad, surgen nuevos procesos de fabricación que tratan de reducir estos costes significativamente. Sobre todos estos nuevos procesos destaca la fabricación aditiva o de impresión 3D. Dentro de la fabricación aditiva, la técnica de "laser melting powder bed fusion (LM-PBF)", es una de las técnicas más versátiles, encontrándose limitada únicamente por el tamaño de pieza que se puede producir dentro de un espacio de construcción que generalmente llega hasta 400x400x400 mm³. El LM-PBF puede reducir los flujos de residuos asociados con los procesos de fabricación convencionales, ya que requiere menos accesorios, herramientas de corte, menos virutas y fluido para trabajar metales, lo que se traduce en una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

El presente trabajo se centra en el análisis experimental de una herramienta de torneado con canales de refrigeración interna en circuito cerrado e impresa mediante tecnología LM-PBF que permita reducir las temperaturas generadas durante el mecanizado, posibilitando por un lado aumentar la vida útil de la herramienta y por otro, reducir el consumo de líquido refrigerante. Ambos beneficios en conjunto suponen una reducción drástica de los costes de fabricación y un objetivo de interés para la industria. Durante el desarrollo de los ensayos experimentales, se han analizado la influencia de distintos parámetros de corte en las temperaturas y fuerzas de corte alcanzadas durante el mecanizado de PEEK extruido.

1. Introducción

La industria de la fabricación se encuentra en constante evolución, a través de la búsqueda de nuevos materiales, así como nuevos procesos de fabricación que permitan entre otras cosas la reducción de tiempos y costes. Es un sector que genera riqueza y alto valor añadido con un importante efecto tractor sobre otros sectores industriales. Una parte importante de este sector se centra en el estudio y desarrollo de nuevas herramientas que posibiliten, entre otros, el mecanizado de nuevas aleaciones de difícil maquinabilidad, como son por ejemplo las aleaciones base níquel, con el Inconel 718 y el Haynes 282 como dos de sus máximos exponentes.

Uno de los desafíos científicos y tecnológicos dentro del sector de la fabricación es el desarrollo de herramientas que sean capaces de soportar las elevadas temperaturas que se crean en la superficie de contacto entre la herramienta y la pieza a mecanizar, las cuales, suponen una reducción drástica de la vida útil de la herramienta.

De manera general, existen en el mercado diferentes materiales para herramientas de corte (HSS, metal duro, cermet, cerámicas, CBN, PCD, etc.) donde los cermet (habitualmente carburo de tungsteno embebido en una matriz metálica) son unos de los materiales más empleados en la fabricación de insertos de corte. Para su fabricación, todos los componentes se muelen a la granulometría necesaria y se mezclan junto con etanol, agua y un aglomerante orgánico, para después secarse y obtener un polvo. Dicha mezcla es enviada a una prensa donde se obtiene una plaquita muy frágil, por lo que debe introducirse en un horno de sinterización para su templado (13 horas a 1500°C). Por último, las plaquitas de corte se rectifican hasta obtener el tamaño y tolerancias necesarias para el proceso de torneado y, generalmente, se recubren. La fabricación de plaquitas de corte mediante procesos mecánicos más tradicionales (prensado, torneado, fresado...) suponen unos costes elevados. En la fabricación de motores, los costes de mecanizado se estiman en un 35% del coste total de fabricación del componente [1]. Es por ello que, en la actualidad, surgen nuevos procesos de fabricación que tratan de reducir estos costes de fabricación significativamente. Sobre todos estos nuevos procesos destaca la fabricación aditiva o de impresión 3D.

La adopción de la fabricación aditiva (AM) por parte de la industria [2] se está acelerando como método de fabricación rápida de componentes metálicos. El principio básico de la tecnología de fabricación aditiva es que un modelo 3D generado por CAD se utiliza directamente para fabricar un objeto tridimensional agregando capa sobre capa de material y fusionándose. Aunque inicialmente estaban relacionadas con la creación rápida de prototipos en un contexto de desarrollo de productos, en los últimos años estas tecnologías han avanzado a pasos agigantados y han pasado de la fabricación de prototipos a la fabricación de piezas listas para la producción. En las tecnologías basadas en fusión por polvo (PBF), el lecho de polvo se fusiona aplicando energía térmica. Sus principales representantes son: sinterización/fusión selectiva por láser (SLS/SLM), la sinterización directa de metales por láser (DMLS) y la fusión por haz de electrones (EBM). Dentro de éstas, la fusión selectiva por láser (SLM) tiene el potencial de obtener piezas con una microestructura fina y altas propiedades mecánicas [3]. La principal diferencia entre SLM y SLS es que SLS no funde completamente el polvo metálico, mientras que SLM lo hace por completo. SLS combina un material estructural que permanece sólido durante todo el proceso y un material aglutinante; pero SLM consigue piezas totalmente densas en un solo componente con partículas de polvo totalmente fundidas [4]. En la actualidad existen distintos materiales que se emplean en la fabricación aditiva siendo el poliéter éter cetona (PEEK) uno de los más destacados. En particular, presenta propiedades que lo hacen destacar en distintas industrias, siendo alguna de ellas la resistencia a la corrosión, su comportamiento a alta temperatura y unas propiedades mecánicas sobresalientes [5], [6], [7]. Es por ello que el PEEK se considera un polímero de alto rendimiento con un tremendo potencial.

En la actualidad, las corrientes ambientales han llegado a los procesos de fabricación, convirtiéndose en un aspecto problemático debido a las cada vez más estrictas normativas sobre residuos, emisiones contaminantes, así como problemas de salud para los trabajadores. Así, si bien es necesario optimizar y mejorar los procesos de fabricación, también es necesario incrementar los esfuerzos para reducir el impacto de la actividad industrial en el medio ambiente y la salud. Durante el mecanizado, los fluidos de corte reducen la fricción en la interfaz herramienta-viruta; ayudan en la eliminación de virutas del área de corte; y reducen tanto la temperatura de la herramienta como de la pieza de trabajo [8]. Durante el mecanizado se utilizan principalmente dos tipos de fluidos de corte, ambos a base de aceites minerales y aditivos para enriquecer sus propiedades [9]. Estos componentes químicos reaccionan durante el proceso de mecanizado con la herramienta de corte y la pieza de trabajo generando desechos contaminantes peligrosos para la salud humana y el medio ambiente, como cloruros y sulfuros [9]. Además, la gestión de los sistemas de refrigeración (FC) supone hasta el 17% de los costes totales de producción, siendo ineficaz en muchos casos actuando lejos de las zonas de máxima temperatura [10]. Técnicas como la lubricación de cantidad mínima (MQL) [11] o los fluidos de corte de cantidad mínima (MQCF) [9] se utilizan cada vez más en el mecanizado de superaleaciones, lo que permite una reducción significativa en fluidos de corte y mayor eficiencia en comparación con los sistemas convencionales. La aplicación de fluido de corte a alta presión (HPJC) también es una técnica adecuada para reducir el desperdicio y evitar condiciones agresivas en condiciones secas en ausencia de fluido de corte. HPJC crea un flujo turbulento que promueve la disipación de calor tanto en la herramienta como en la pieza de trabajo. En el enfriamiento convencional el fluido de corte que llega al área de corte entra en contacto con zonas calientes, hirviendo y generando una disminución en la eficiencia, sin embargo, usando alta presión, el fluido de corte es capaz de penetrar la capa de ebullición y aumentar la disipación de calor [12].

La temperatura medida [13] en la interfaz herramienta-viruta aumenta con la velocidad de corte (V_c), obteniéndose para una velocidad de 30 y 90 m/min, 910 y 1130 °C respectivamente. La temperatura de la viruta medida por la cámara de infrarrojos [14] al tornearse la aleación IN718 con MQL y $V_c = 60$ m/min fue de 575 °C, y en corte seco la temperatura de la viruta aumentó a 846 °C. Se utilizó un pirómetro de fibra óptica de dos colores [15] para la medición localizada de la temperatura de la pieza de trabajo al tornearse la aleación IN718 en el rango $V_c = 60$ a 180 m/min y la temperatura de la superficie de la pieza de trabajo aumentó ligeramente de 420 a 450 °C con un avance $f = 0,05$ mm/rev a mayor V_c , pero disminuyó ligeramente de 295 a 255 °C a mayor V_c con $f = 0,1$ mm/rev. A medida que aumenta la temperatura en la zona localizada de deformación plástica, se desarrolla una tendencia al ablandamiento por deformación (formación de bandas de cizallamiento), creando una forma de viruta

severamente aserrada [14] que da como resultado una superficie rugosa y un aumento de la tensión de tracción residual en la superficie de la pieza de trabajo.

Existen numerosos estudios en la literatura que analizan el comportamiento de disipadores con microcanales desde el punto de vista de la fluidodinámica y la transferencia de calor. Algunos de estos estudios [16-18] concluyen que los modelos tradicionales de macrocanales describen con suficiente precisión el comportamiento de los microcanales. Sin embargo, hay también un gran número de autores que establecen que la teoría convencional aplicada a macrocanales no es extrapolable para su aplicación a nivel de la microescala [19-21].

El presente trabajo se centra en el análisis experimental de una herramienta de torneado con canales de refrigeración interna en circuito cerrado e impresa mediante tecnología SLM que permita reducir las temperaturas generadas durante el mecanizado, posibilitando por un lado aumentar la vida útil de la herramienta y por otro, reducir el consumo de líquido refrigerante. Ambos beneficios en conjunto suponen una reducción drástica de los costes de fabricación y un objetivo de interés para la industria. Durante el desarrollo de los ensayos experimentales, se han analizado la influencia de distintos parámetros de corte en las temperaturas y fuerzas de corte alcanzadas durante el mecanizado de PEEK extruido.

2. Puesta a punto

En esta sección se describe el montaje experimental empleado para la cuantificación de fuerzas de corte y temperatura durante el mecanizado de una barra de PEEK extruido empleando la plaquita de corte fabricada mediante fabricación aditiva.

2.1. Mecanizado

Los ensayos de mecanizado se realizaron en un torno Pinacho Smart turn 6/165 equipado con un dinamómetro Kistler 9257B y un amplificador de carga multicanal montados juntos para registrar simultáneamente, mientras se ensayaban, las fuerzas de corte en tres direcciones principales de corte. Los valores cuantificados durante cada ensayo se almacenaron en un ordenador mediante un sistema de adquisición de datos.

Los ensayos de torneado se han realizado sin refrigerante y con aire circulando por los microcanales, manteniendo en 0,2 mm la profundidad de pasada, resumiéndose los principales parámetros de corte ensayados en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de corte utilizados en los ensayos de taladrado.

Parámetros de Corte	
Velocidad de corte [m/min]	100; 150, 200
Avance [mm/rev]	0,05; 0,1; 0,2

Las plaquitas de corte desarrolladas para este estudio han sido fabricadas a través de la tecnología de fusión selectiva por láser en acero de herramientas 1.2709 cuyas principales propiedades se resumen en la siguiente Tabla 2. La geometría de la plaquita es positiva y corresponde a un radio de punta de 0,4 mm y un ángulo de punta de 80° fabricada además con los microcanales para la óptima refrigeración de esta.

Tabla 2. Composición química del acero martensítico 1.2709 [22].

Elemento	Al	C	Co	Cr	Fe	Mn	Mo	N	Ni	O	P	S	Si	Ti
Min.wt%	-	-	8,5	-	Balance	-	4,5	-	17,0	-	-	-	-	0,8
Max.wt%	0,1	0,03	10,0	0,25	Balance	0,15	5,2	0,10	19,0	0,10	0,01	0,01	0,1	1,2

Dado que se desconoce el comportamiento de la herramienta impresa durante el mecanizado, se realizaron pruebas de torneado en un polímero termoplástico de ingeniería semicristalino (PEEK), que es un material relativamente fácil de mecanizar que se utiliza en numerosos campos, especialmente en las industrias aeronáutica, automotriz y biomédica. En la Figura 1.a) se muestra el montaje experimental y los principales componentes utilizados durante los ensayos de torneado: el torno, la cámara IR, la plaquita de corte refrigerada internamente y la muestra realizada en PEEK. La Figura 1.b) muestra la imagen térmica del área de corte obtenida de la cámara infrarroja.

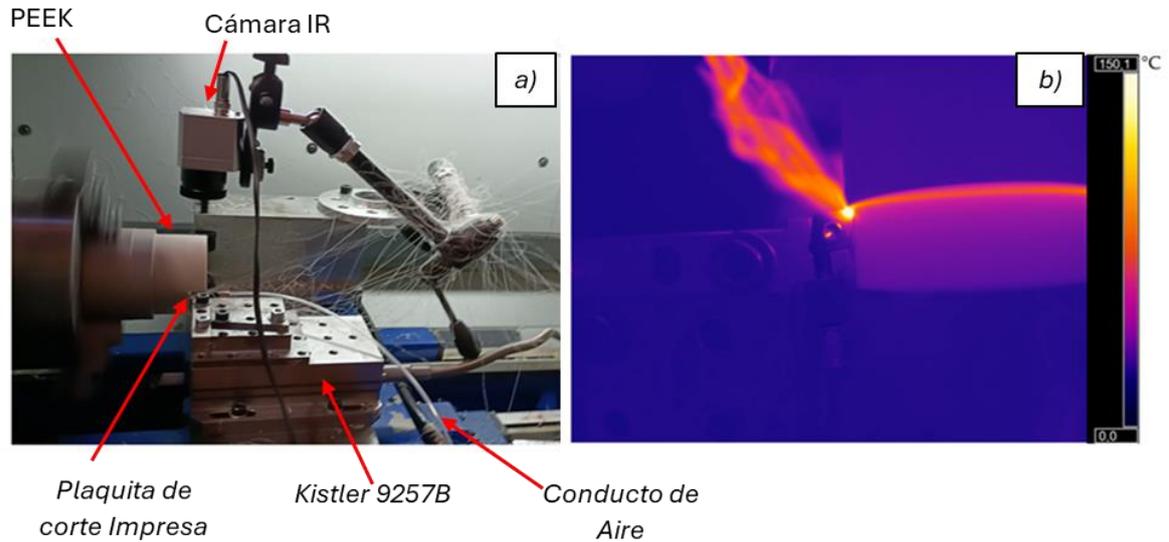


Figura 1. (a) Montaje de la instalación experimental del sistema de refrigeración interna en circuito abierto con aire. (b) Imagen termográfica de la zona de cizallamiento.

2.2. Refrigeración

La Figura 2.a) muestra el esquema de diseño del sistema de refrigeración interno, que consiste en un microcanal circular de diámetro 1 mm que recorre el interior de la pieza, donde el fluido refrigerante (aire en este caso) entra por un extremo de la plaquita, y sale al exterior por el otro extremo, circulando en circuito abierto. La Figura 2.b) muestra la plaquita de corte con microcanal utilizada durante los experimentos, que fue obtenida mediante impresión 3D, y la Figura 2.c) muestra un detalle del rebaje que hubo que mecanizar en el portaherramientas para fijar la plaquita de corte con el sistema de refrigeración interno al mismo.

Durante los experimentos del mecanizado de la plaquita con refrigeración interna, se utilizó una línea de aire de 2,6 bares para impulsar 4,7 l/min de aire a través del microcanal circular de 1 mm de diámetro, lo que corresponde a una velocidad del aire por el microcanal de unos 100 m/s. El flujo de aire se controla y mide utilizando un caudalímetro de presión diferencial OMEGA FMA-2607A, cuyo fondo de escala (FE) es 10 l/min, con una precisión de $\pm(0,8\% \text{ medida} + 0,2\% \text{ FE})$. Por tanto, la medición del flujo de aire sería $4,7 \pm 0,0576 \text{ l/min}$.

Para analizar la efectividad del sistema de enfriamiento por microcanales propuesto, se empleó una cámara infrarroja Optris PI640i-O33, proporcionando datos en tiempo real sobre las condiciones térmicas de la herramienta. El tamaño de píxel de la cámara a la distancia de 0,2 m es de 0,2 mm. La principal fuente de incertidumbre en la medida termográfica de la temperatura está en la correcta determinación de la emisividad de la herramienta. En este trabajo, estimamos una emisividad de la herramienta cercana al 100%, debido a la alta rugosidad de la superficie de la herramienta impresa.

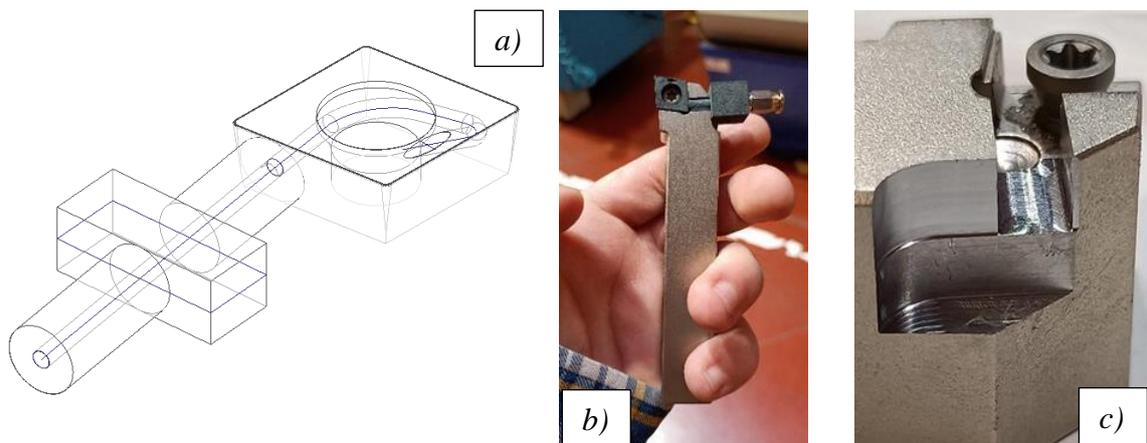


Figura 2. (a) Esquema del diseño del sistema de refrigeración interna; (b) Impresión 3D de la plaquita de corte con el sistema de refrigeración interna en acero para herramientas; (c) Detalle del rebaje en el portaherramientas para la fijación del inserto al portaherramientas.

3. Resultados

3.1. Análisis de fuerzas de corte y par

Para cada ensayo se cuantificó la progresión de las fuerzas de corte durante el mecanizado. Cada ensayo se realizó dos veces para asegurar la repetibilidad de los resultados, obteniéndose desviaciones cuando se compararon con el valor medio inferiores al 5%, por lo que para posteriores análisis se eligió el valor medio obtenido a través del promedio de 5 mediciones en la zona de fuerza estable. Para ver el efecto de la velocidad de corte se seleccionaron tres velocidades y tres avances, analizando posibles tendencias (Tabla 1).

En la Figura 3 se representan las fuerzas de corte obtenidas durante el mecanizado del PEEK extruido en relación con el avance y la velocidad de corte para cada condición ensayada. Como se puede observar y con carácter general se obtuvieron mayores fuerzas de corte para la herramienta refrigerada con respecto a la herramienta sin refrigerar, esto es debido a la reducción de la temperatura alcanzada en la zona de corte, lo cual, redundando en una disminución del estado plástico del material, y, en consecuencia, un aumento de las fuerzas de corte. En relación con la influencia del avance durante la generación de fuerzas (Figura 3.a)) podemos observar que de manera general aumentos en el avance derivan en un aumento de la fuerza, obteniéndose hasta 10 N de diferencia al aumentar el avance de 0,1 a 0,2 mm/rev para el caso de la herramienta refrigerada a 100 m/min. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Davim et al. [23] durante el torneado de PEEK, según el cual, aumentos en el avance derivan en un aumento de las fuerzas de corte para los casos analizados. No obstante, esta tendencia no se cumple para la herramienta refrigerada a la mayor velocidad de corte (200 m/min), y para la herramienta sin refrigerar a la velocidad de corte intermedia (150 m/min), los cuales, exhiben una tendencia totalmente contraria. En el caso del efecto de la velocidad de corte sobre las fuerzas (Figura 3.b)) no se observa una tendencia clara para la velocidad de corte más elevada (200 m/min) para ninguno de los casos analizados. No obstante, a velocidades de corte bajas o medias (100 a 150 m/min), las fuerzas de corte aumentan con carácter general, obteniéndose incrementos de hasta 14 N para el caso de la herramienta sin refrigerar a 0,05 mm/rev.

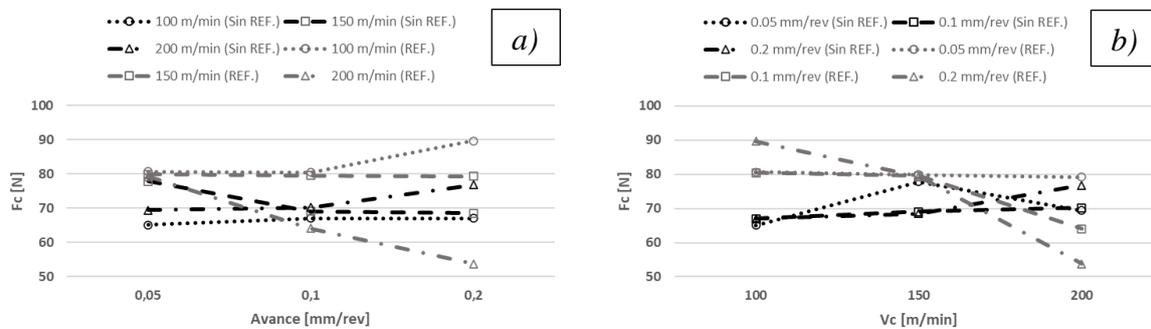


Figura 3. Evolución de la fuerza de corte con respecto al avance [mm/rev] (a)); y la velocidad de corte [m/min] (b))

3.2. Análisis de la temperatura

Como se puede observar en la Figura 4, la temperatura de la plaquita en la zona de corte aumenta con el avance para ambas velocidades de corte. Esto se debe a que al existir una mayor sección de la viruta se necesita más energía para eliminar el material, por lo que es de esperar que una parte proporcional de esta energía mecánica se transforme en calor, transmitido por conducción a la pieza. Sin embargo, la temperatura máxima obtenida del ensayo a velocidad de corte 200 m/min y avance 0,2 mm/rev es inferior a la que correspondería para continuar con la tendencia de aumento de temperatura con el avance, debido que en este ensayo se formó ovillo de material de corte que se situó entre la cámara y la superficie de la plaquita, y que impidió la correcta determinación de la temperatura de la herramienta. Comparando ambas velocidades se puede deducir que, en general, la temperatura también aumenta con la velocidad de corte, debido a que aumenta la fricción en la zona de corte.

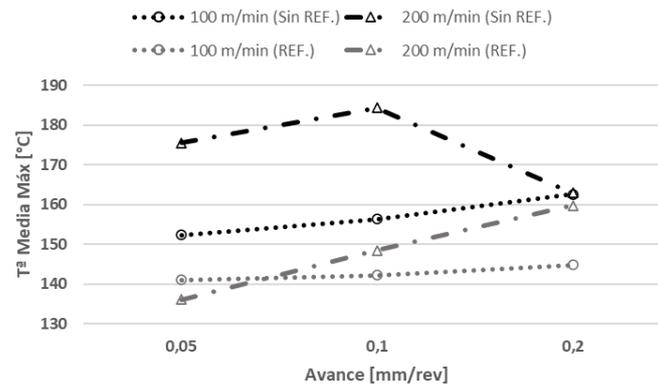


Figura 4. Evolución de la temperatura de la plaquita de corte con el avance para $V_c = 100$ y 200 m/min con y sin refrigeración.

En relación la presencia o no de refrigeración interna, se puede observar que se ha conseguido reducir la temperatura de la herramienta unos 15 °C para velocidades de corte de 100 m/min, y unos 30 °C para velocidades de corte de 200 m/min. Puesto que se alcanzan mayores temperaturas en la herramienta para velocidades de corte altas, la capacidad de refrigeración del aire a temperatura ambiente será mayor.

4. Conclusiones

El presente trabajo se centra en el análisis experimental de una herramienta de torneado con canales de refrigeración interna en circuito cerrado e impresa mediante tecnología LM-PBF que permita reducir las temperaturas generadas durante el mecanizado, posibilitando por un lado aumentar la vida útil de la herramienta y por otro, reducir el consumo de líquido refrigerante. Cabe destacar que los ensayos son preliminares sobre prototipo, siendo necesario analizar su comportamiento en ritmos de producción industriales. Durante el desarrollo de los ensayos experimentales, se han analizado la influencia de distintos parámetros de corte en las temperaturas y fuerzas de corte alcanzadas durante el mecanizado de PEEK extruido y se ha podido llegar a las siguientes conclusiones:

- Se ha podido comprobar cómo la herramienta fabricada mediante impresión con microcanales es capaz de soportar los esfuerzos derivados del mecanizado de PEEK.
- Con carácter general se obtuvieron mayores fuerzas de corte para la herramienta refrigerada con respecto a la herramienta sin refrigerar, esto es debido a la reducción de la temperatura alcanzada en la zona de corte, lo cual, redundaría en una disminución del estado plástico del material, y, en consecuencia, un aumento de las fuerzas de corte.
- En relación con la influencia del avance durante la generación de fuerzas podemos observar que de manera general aumentos en el avance derivan en un aumento de la fuerza, obteniéndose hasta 10 N de diferencia al aumentar el avance de $0,1$ a $0,2$ mm/rev para el caso de la herramienta refrigerada a 100 m/min.
- En el caso del efecto de la velocidad de corte sobre las fuerzas no se observa una tendencia clara para la velocidad de corte más elevada (200 m/min) para ninguno de los casos analizados. No obstante, a velocidades corte bajas o medias (100 a 1550 m/min), las fuerzas de corte aumentan con carácter general, obteniéndose incrementos de hasta 14 N para el caso de la herramienta sin refrigerar a $0,05$ mm/rev.
- En relación con la temperatura de la plaquita en la zona de corte, ésta aumenta con el avance para ambas velocidades de corte. Esto se debe a que al existir una mayor sección de la viruta se necesita más energía para eliminar el material, por lo que es de esperar que una parte proporcional de esta energía mecánica se transforme en calor, transmitido por conducción a la pieza.
- Se ha conseguido reducir la temperatura de la herramienta unos 15 °C para velocidades de corte de 100 m/min, y unos 30 °C para velocidades de corte de 200 m/min, debido principalmente a que se alcanzan mayores temperaturas en la herramienta para velocidades de corte altas, y, por lo tanto, la capacidad de refrigeración del aire a temperatura ambiente será mayor.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen al proyecto de investigación ROTORNEA-CM-UC3M, que ha sido financiado por la convocatoria “Estímulo a la Investigación de Jóvenes Doctores/as” en el marco del “Convenio Plurianual con la

UC3M (ROTORNEA-CM-UC3M)” y el “V PRICIT (V Plan Regional de Investigación Científica e Innovación Tecnológica).

6. Referencias

- [1]. Schirra, J.J.; Viens, D.V. “Metallurgical Factors Influencing the Machinability of Inconel 718. Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivates”; Loria, E.A., Ed.; *The Minerals, Metals & Materials Society: Warrendale, PA, USA*, 1994; pp. 827–838.
- [2]. Attaran, M. “The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional Manufacturing”. *Bus. Horiz.* 2017, **60**, 677–688.
- [3]. Wood P., Díaz-Álvarez A., Díaz-Álvarez J., Miguélez M.H., Rusinek A., Gunpath U.F., Williams G., Bahi S., Sienkiewicz J., Piatek, P. “Machinability of INCONEL718 alloy with a porous microstructure produced by laser melting powder bed fusion at higher energy densities”. *Materials* 2020, **13** (24), art. no. 5730, pp. 1-13.
- [4]. Kruth JP, Levy G, Klocke F, Childs THC (2007) “Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing.” *CIRP Ann* **56**(2):730–759. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.10.004>
- [5]. A. Pulipaka, K. Manoj, A. Beheshti, Z.S. Bagheri. “Effect of 3D printing process parameters on surface and mechanical properties of FFF-printed PEEK”. *J. Manuf. Process.*, **85** (2023), pp. 368-386.
- [6] T.C. Lee, R. Ramlan, N. Shahrubudin, T.C. Lee, R. Ramlan. “An overview on 3D printing technology: technological, materials, and technology: applications technological, materials, an overview on 3D printing and applications.” *Procedia Manuf.*, **35** (2019), pp. 1286-1296, 10.1016/j.promfg.2019.06.089
- [7] Y. He, M. Shen, Q. Wang, T. Wang, X. Pei. “Effects of FDM parameters and annealing on the mechanical and tribological properties of PEEK”. *Compos. Struct.*, **313** (2023), Article 116901, 10.1016/j.compstruct.2023.116901
- [8]. Díaz-Álvarez, A., Díaz-Álvarez, J., Cantero, J.L., Miguélez, H., 2019. “Sustainable high-speed finishing turning of haynes 282 using carbide tools in dry conditions”. *Metals (Basel)*. **9**.
- [9]. Gajrani, K.K., Suvin, P.S., Kailas, S.V., Sankar, M.R., 2019. “Hard machining performance of indigenously developed green cutting fluid using flood cooling and minimum quantity cutting fluid.” *J. Clean. Prod.* **206**, 108–123.
- [10]. Amiril, S.A.S., Rahim, E.A., Syahrullail, S., 2017. “A review on ionic liquids as sustainable lubricants in manufacturing and en^ongineering: Recent research, performance, and applications”. *J. Clean. Prod.* **168**, 1571–1589.
- [11]. Wang, C., Li, K., Chen, M., Liu, Z., 2015. “Evaluation of minimum quantity lubrication effects by cutting force signals in face milling of Inconel 182 overlays”. *J. Clean. Prod.* **108**, 145–157.
- [12]. Ezugwu, E.O., Da Silva, R.B., Bonney, J., MacHado, Á.R., 2005. “Evaluation of the performance of CBN tools when turning Ti-6Al-4V alloy with high pressure coolant supplies”. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* **45**, 1009–1014.
- [13]. Narutaki, N.; Yamane, Y.; Hayashi, K.; Kitagawa, T.; Uehara, K. “High-speed Machining of Inconel 718 with Ceramic Tools”. *CIRP Ann.* 1993, **42**, 103–106.
- [14]. Kaynak, Y.; Tascioglu, E. “Finish machining-induced surface roughness, microhardness and XRD analysis of selective laser melted Inconel 718 alloy”. *Procedia CIRP* 2018, **71**, 500–504.
- [15]. Díaz-Álvarez, J.; Tapetado, A.; Vázquez, C.; Miguélez, H. “Temperature measurement and numerical prediction in machining inconel 718”. *Sensors* 2017, **17**, 1531.
- [16] Harms, T. M., Kazmierczak, M. J., & Gerner, F. M. (1999). “Developing convective heat transfer in deep rectangular microchannels.” *International Journal of Heat and Fluid Flow*, **20**(2), 149–157.
- [17] Lee, P. S., Ho, J. C., & Xue, H. (2002). “Experimental study on laminar flow and heat transfer in rectangular microchannels”. *Intersociety Conference on Thermal and Thermophysical Phenomena in Electronics Systems*, 379–386.
- [18] Lu, B., Mei, F., Meng, W. J., & Guo, S. (2013). “Fabrication of metal-based microchannel heat exchangers and quantification of their liquid flow and heat transfer characteristics”. *Heat Transfer Engineering*, **34**(1), 15–28.
- [19] Wang, B. X., & Peng, X. F. (1994). “Experimental investigation on liquid forced-convection heat transfer through microchannels”. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **37**(SUPPL. 1), 73–82.
- [20] Rahman, M. M. (2000). “Measurements of heat transfer in microchannel heat sinks”. *International Communications of Heat and Mass Transfer*, **27**(4), 495–506.
- [21] Pfund, D., Rector, D., & Shekarraz, A. (2000). “Pressure Drop Measurements in a Microchannel”. *Fluid Mechanics and Transport Phenomena*, **46**(8)
- [22] Costas M, Edwards-Mowforth M, Kristoffersen M, et al. “Ballistic impact resistance of additive manufactured high-strength maraging steel: An experimental study”. *International Journal of Protective Structures*. 2021;**12**(4):577-603. doi:10.1177/20414196211035486
- [23]. J. Paulo Davim, Pedro Reis, Vítor Lapa, C. Conceição António, “Machinability study on polyetheretherketone (PEEK) unreinforced and reinforced (GF30) for applications in structural components.” *Composite Structures*, Volume **62**, Issue 1, 2003, Pages 67-73, ISSN 0263-8223, [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(03\)00085-0](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(03)00085-0).