



Efecto del redondeo de la arista de corte en procesos de mecanizado de la aleación Ti6Al4V

J.L. Cantero Guisández¹, A. Guerra Sancho¹, J. Díaz Álvarez¹, A. Sáez Álvarez¹, M. Alonso Martín², M.H. Miguélez Garrido¹,

¹ Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid, jcantero@ing.uc3m.es.

² Canal de Isabel II

La microgeometría del filo de las herramientas de corte tiene un efecto determinante tanto en su duración como en la calidad del acabado de la pieza. Actualmente se están logrando avances significativos en la implementación de técnicas que permiten obtener con elevada precisión redondeos de arista de corte tanto simétricos como asimétricos. Para aprovechar el potencial de estas tecnologías es necesario determinar el efecto de los distintos tipos de redondeo de filo sobre el rendimiento de la herramienta en función de los parámetros de corte y material mecanizado.

En este trabajo se han desarrollado modelos numéricos bidimensionales de procesos de mecanizado de la aleación Ti6Al4V considerando distintas preparaciones de filo y parámetros de corte. Estos modelos han sido validados a partir de resultados experimentales obtenidos de referencias científicas internacionales.

Los resultados obtenidos confirman la necesidad de emplear elevadas densidades de mallado para poder reproducir el efecto de las distintas preparaciones de filo y la relevancia de establecer redondeos de filo adecuados a cada proceso de mecanizado. El incremento del radio de la arista de corte incrementa la robustez de la herramienta frente a determinados tipos de desgaste como el astillado, pero provoca mayores esfuerzos de corte y temperaturas que aceleran otros mecanismos de desgaste como la abrasión o la difusión. Este efecto es especialmente relevante en los procesos de mecanizado de titanio debido a que este material se vuelve extremadamente reactivo por encima de aproximadamente 600°C.

1. Introducción

Una de las características de la herramienta de corte que más influye en el proceso de mecanizado es la microgeometría del filo, que incluye distintos parámetros como redondeo del filo, biselado y rugosidad del filo. Este trabajo se centra en el análisis de la influencia del redondeo del filo, considerando tanto redondeos simétricos como redondeos asimétricos, estos últimos caracterizados por presentar distintos radios de redondeo en las superficies de incidencia y desprendimiento.

Mayores redondeos de filo se relacionan con herramientas más robustas y por tanto más resistentes al desgaste. No obstante, también debe considerarse que variaciones en la geometría del filo afectan a la deformación del material y a la generación de calor en la zona de corte dando lugar a distintas distribuciones de temperatura en el material y la herramienta, así como a distintas distribuciones de presión en la zona de contacto superficie-herramienta. Estos efectos termomecánicos afectan significativamente tanto a la calidad del componente mecanizado como a la severidad del desgaste de la herramienta. En concreto, mayores redondeos de filo se relacionan con peores acabados en la pieza y condiciones en la zona de corte más agresivas para la herramienta. Los redondeos asimétricos pueden ser una opción interesante en algunas aplicaciones por permitir combinar geometrías de filo robustas manteniendo reducidas fuerzas de corte y temperaturas [1-3].

Numerosos estudios han demostrado que una preparación adecuada del filo puede prolongar significativamente la vida útil de la herramienta, lo que contribuye a la sostenibilidad de las herramientas de corte. Por ejemplo, investigaciones colaborativas realizadas por socios de CIRP evaluaron diversos métodos de preparación del filo en el fresado de diferentes materiales, como aceros endurecidos e inoxidable, Inconel 718 y Ti6Al4V [4]. Estos estudios destacan los considerables beneficios de la preparación del filo, especialmente para materiales de difícil mecanizado.

No obstante, la efectividad de la preparación del filo de corte depende de la adaptación del diseño y del proceso a la aplicación de mecanizado específica, al material de la pieza de trabajo y a la carga termomecánica. La microgeometría óptima del filo de corte está determinada en gran medida por el material a mecanizar y las condiciones de corte. Por lo tanto, el desarrollo de un diseño adecuado del filo de corte requiere amplias investigaciones experimentales para optimizar el rendimiento de la herramienta [5-7].

Con el objetivo de reducir el número de campañas experimentales, existen enfoques para diseñar y optimizar la microgeometría del filo de corte basados en simulaciones de Elementos Finitos y modelos estadísticos [8-11].

En línea con este enfoque, el presente trabajo se centra en el desarrollo de modelos numéricos bidimensionales de procesos de mecanizado de corte ortogonal de la aleación Ti6Al4V considerando distintas microgeometrías de filo y parámetros de corte. Estos modelos han sido validados a partir de resultados experimentales obtenidos por C.F. Wyen y K. Wegener en el corte ortogonal de Ti6Al4V con redondeos de filo en un rango 10 a 50 micras de radio, obtenidos mediante microchorreado abrasivo [1].

2. Metodología

Para la validación de los modelos numéricos desarrollados se han empleado los resultados experimentales mostrados en el artículo “Influence of Cutting Edge Radius on Cutting Forces in Machining Titanium” [1] realizado por C.F. Wyen y K. Wegener. Dichos ensayos consistieron en operaciones de torneado con corte ortogonal, empleando refrigeración con fluido de corte soluble y mecanizando barras de la aleación Ti6Al4V. Las magnitudes empleadas para la validación de los modelos fueron las componentes de la fuerza de mecanizado que se registraron en los ensayos mediante un dinamómetro Kistler 9121. Las herramientas ensayadas fueron herramientas de plaquita intercambiable de carburo de wolframio (WC-Co) fabricadas con un ángulo de desprendimiento $\gamma=10^\circ$, un ángulo de incidencia de $\alpha=8^\circ$ y distintas preparaciones de filo.

La Tabla 1 muestra las geometrías de filo, los parámetros de corte y las fuerzas de corte y avance correspondientes a los ensayos considerados para la validación de los modelos. Tal y como se indica en la tabla, las microgeometrías corresponden a redondeos simétricos del filo con radios 10 μm , 20 μm y 40 μm . Estas geometrías y parámetros fueron los que inicialmente se modelizaron numéricamente para ajustar y validar el modelo. Una vez realizada la validación, se desarrollaron simulaciones adicionales con geometrías de filo con redondeo asimétrico para determinar el efecto de dichas geometrías sobre las principales magnitudes implicadas en el mecanizado.

Para el análisis de las simulaciones numéricas se consideraron las variables más relacionadas con el desgaste de la herramienta y con el daño termomecánico en el componente mecanizado:

- Componentes de la fuerza de mecanizado (fuerza de corte y fuerza de avance).
- Temperatura máxima en la zona de corte.

- Presión normal sobre la herramienta.

Tabla 1: Geometría de filo, parámetros de corte y fuerzas (ensayos de validación del modelo).

Geometría de filo	Parámetros de corte		F _c (N)	F _a (N)
	a (mm/rev)	v _c (m/min)		
r=10μm	0,1	70	175	55
		30	185	62,5
	0,06	70	122,5	52,5
		30	120	50
r=20μm	0,1	70	180	85
		70	130	80
	0,06	70	187,5	155
		30	205	150
r=40μm	0,1	70	140	145
		30	147,5	137,5
	0,06	70	140	145
		30	147,5	137,5

3. Definición y validación del modelo numérico

3.1. Definición del modelo numérico

Se ha realizado un modelo numérico bidimensional correspondiente al mecanizado de la aleación Ti6Al4V considerando condiciones de deformación plana. Este tipo de modelización es una aproximación adecuada para la modelización de procesos de corte ortogonal en los que la relación entre la profundidad de pasada y el espesor de viruta no deformada es al menos igual a 12. El modelo se ha definido en el entorno de programación DEFORM 2D basado en formulación Lagrangiana con remallado automático por lo que es muy adecuado para simular procesos con grandes deformaciones plásticas.

Definición de la pieza: material, geometría y mallado:

Para la caracterización del material de la pieza se ha empleado la información disponible en la librería de DEFORM para el Ti6Al4V, que establece mediante valores numéricos ordenados en tablas la relación entre las principales variables termomecánicas (tensión, deformación, velocidad de deformación y temperatura). En la librería también se definen otras propiedades del material relevantes para las simulaciones como el coeficiente de expansión térmica, la conductividad térmica y el calor específico para distintas temperaturas. Se establece comportamiento del material elastoplástico. Por tanto, la caracterización del material empleada es representativa del comportamiento de la aleación Ti6Al4V, pero no es posible verificar su adecuación a las propiedades concretas de las barras de material empleadas en los ensayos de validación, debido a que en el artículo del que se extraen los valores experimentales [1] no se incluye dicha información.

La geometría de la pieza en el modelo es rectangular con 4mm de largo (en la dirección del movimiento de corte) y 1,5mm de alto (correspondiente a la dirección del espesor de viruta no deformada).

Para el mallado de la pieza se emplearon elementos rectangulares isoparamétricos con cuatro nodos. Mediante un análisis de sensibilidad se estableció como óptimo un mallado adaptativo de la pieza con 4 zonas de mallado con distintas densidades (ver Figura 1). En la zona de formación de la viruta (denominada ventana 1 en la Figura 1) se estableció la mayor densidad de mallado con tamaño de los elementos de 5μm. El resto de la viruta formada se malló con elementos de 10μm (ventana 2), densidad suficiente para permitir analizar la morfología de la viruta. La superficie mecanizada se también se malló con una densidad relativamente alta empleando elementos de 15μm (ventana 3) para permitir analizar las temperaturas y tensiones residuales debidas al mecanizado. Por último, para el resto del material se empleó un mallado más basto con tamaño de elemento de 50μm (ventana 4). Para el mallado del material fue necesario emplear un total de aproximadamente 10.000 elementos.

Definición de la herramienta: material, geometría, mallado:

Al igual que se hizo para el material de la pieza, para la caracterización del material de la herramienta se ha empleado la información disponible en la librería de DEFORM, en este caso, la correspondiente al material de corte denominado metal duro constituido por carburo de wolframio con cobalto como aglutinante (WC-Co). Se ha establecido un comportamiento rígido para la herramienta debido a que sus deformaciones son muy reducidas y no afectan significativamente a los resultados de la simulación.

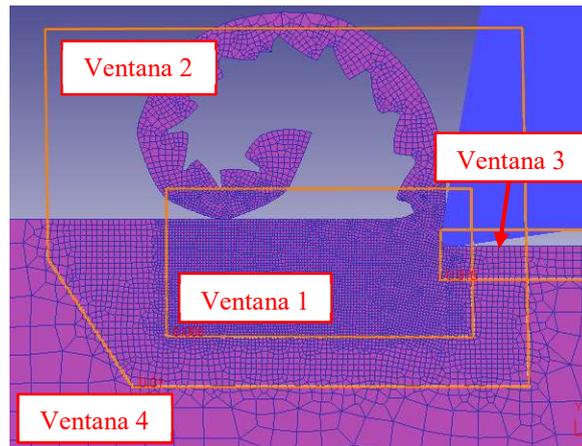


Figura 1: Ventanas que definen el mallado adaptativo de la pieza.

La Figura 2 muestra las 6 geometrías de filo modelizadas: 4 con redondeo simétrico y 2 con redondeo asimétrico. De las 4 geometrías con redondeo simétrico, las 3 primeras se establecen con redondeo de filo $10\mu\text{m}$, $20\mu\text{m}$ y $40\mu\text{m}$. La última geometría simétrica se define a través de los parámetros geométricos $S\alpha$ y $S\gamma$, que son los habitualmente empleados para definir los redondeos asimétricos. Para esta última geometría simétrica se ha establecido un valor de $20\mu\text{m}$ para ambos parámetros ($S\alpha$ y $S\gamma$), que corresponde a un radio de filo de $16,91\mu\text{m}$. Por último, los 2 redondeos asimétricos modelizados se corresponden respectivamente con los valores ($S\alpha=20\mu\text{m}$, $S\gamma=40\mu\text{m}$) y ($S\alpha=40\mu\text{m}$, $S\gamma=20\mu\text{m}$). Además, tal y como también se refleja en la Figura 2, se ha añadido a las geometrías de filo un desgaste de flanco de $15\mu\text{m}$ que corresponde con el desgaste que se produce en los primeros instantes del mecanizado según ha sido reflejado por diversos autores. A este desgaste inicial se le denomina habitualmente asentamiento de filo y su valor se ajustó de forma que minimizara el error de los modelos numéricos.

Para el mallado de la herramienta se emplearon elementos similares a los empleados para el mallado de la pieza. Se definió un mallado adaptativo mediante 2 ventanas, una con mallado más denso que afecta a toda la zona de contacto de la herramienta con la viruta y la superficie mecanizada con tamaño de elemento de $5\mu\text{m}$ y otra ventana que engloba el resto de la herramienta con tamaño de elemento de $50\mu\text{m}$. El número total de elementos empleados para el mallado de la herramienta fue de 1800 para todas las geometrías.

Condiciones de contorno y de contacto material-herramienta y condiciones de simulación:

En el modelo se estableció que el movimiento de corte lo realizara la pieza en la dirección horizontal (eje X), fijándose su movimiento en el eje Y (excepto en el material que forma la viruta). Las condiciones de contorno establecidas para la herramienta consistieron en impedir su movimiento en ambas direcciones.

El coeficiente de transferencia de calor al ambiente se estableció en $200\text{N}/(\text{s}\cdot\text{mm}\cdot^\circ\text{C})$ y la temperatura ambiente en 20°C . No obstante, estos valores son poco relevantes puesto que un análisis de sensibilidad específico mostró que debido a que los tiempos simulados son extremadamente reducidos (de pocos milisegundos) el efecto de la transferencia de calor al ambiente es despreciable.

El coeficiente de transferencia de calor herramienta-material se estableció en $45\text{N}/(\text{s}\cdot\text{mm}\cdot^\circ\text{C})$ y el reparto del calor generado en la interfase en un 50% para la pieza y un 50% para la herramienta.

Para el contacto material-herramienta se establecieron 2 leyes de fricción según la zona considerada. En la zona correspondiente al filo y a la superficie de desprendimiento hasta una cota alineada con el espesor de viruta no deformada se consideró ley de contacto con adhesión y coeficiente $m=1$. En el resto de superficies se establecieron condiciones de contacto por fricción de tipo Coulomb con coeficiente $\mu=0,5$. Estas condiciones se definieron en base a la bibliografía científica consultada.

En relación con las condiciones de simulación se definió un avance por paso de $2\mu\text{m}$, adecuado para el tamaño de los elementos empleados para el mallado de la zona de formación de la viruta.

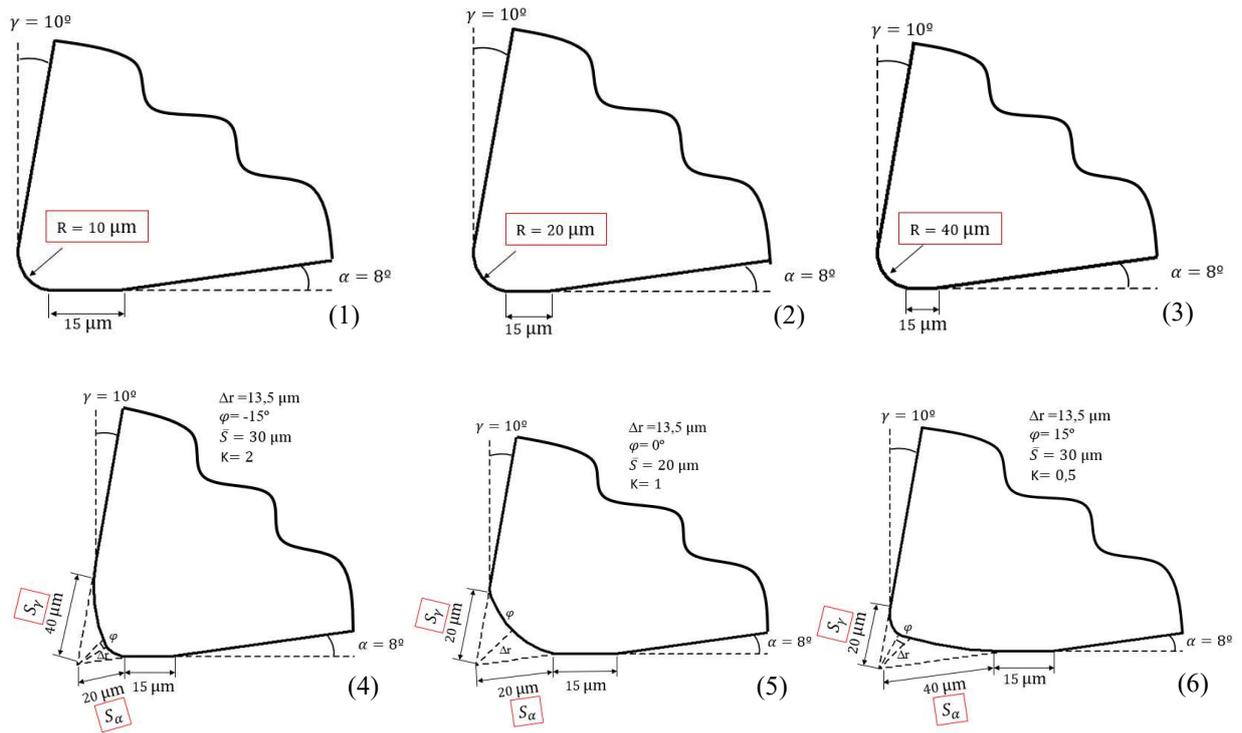


Figura 2: Geometrías de filo consideradas en los modelos numéricos: Redondeos simétricos con radios 10 μm (1), 20 μm (2) y 40 μm (3); Redondeos asimétricos con parámetros $S\alpha=20\mu\text{m}$ y $S\gamma=40\mu\text{m}$ (4) y $S\alpha=40\mu\text{m}$ y $S\gamma=42\mu\text{m}$ (6); Redondeo simétrico con parámetros $S\alpha=20\mu\text{m}$ y $S\gamma=20\mu\text{m}$ (5).

3.2. Validación experimental del modelo numérico

Tal y como se indicó en el apartado 2, la validación del modelo numérico se realizó a partir de los valores de fuerzas obtenidos experimentalmente en las 10 condiciones definidas en la Tabla 1. La Figura 3 y la Figura 4 muestran los correspondientes valores de fuerza de corte y fuerza de avance experimentales y numéricos observándose en general una buena correlación. Los errores relativos de predicción de la fuerza de corte presentan un valor medio del 3,16% y los de la fuerza de avance un valor medio del 6,37%. El error máximo alcanzó el 15,11% y se produce para el ensayo con herramienta con redondeo de radio mayor (40 μm) y velocidad de corte y avances menores (30 m/min y 0,06 mm/rev. respectivamente). Se trata de errores razonables para modelos numéricos de procesos de mecanizado.

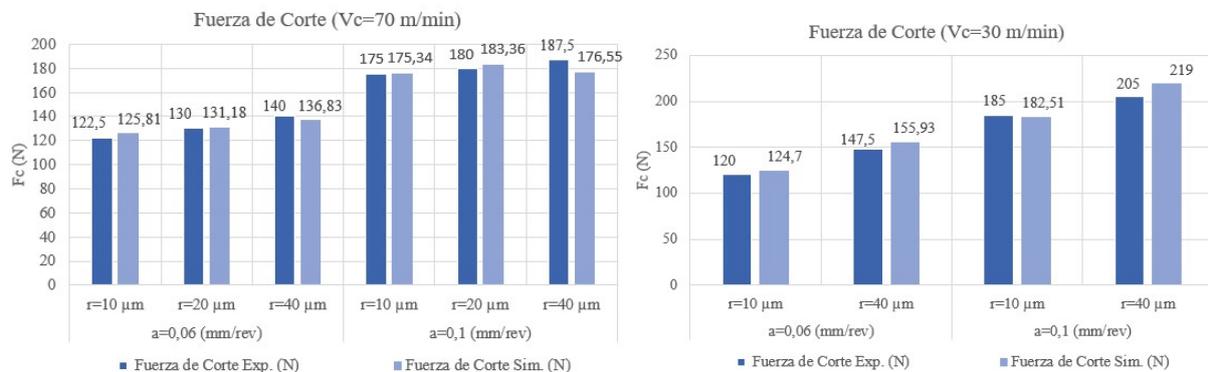


Figura 3: Fuerzas de corte experimentales y obtenidas a partir de modelización numérica para las 10 condiciones consideradas para la validación de los modelos.

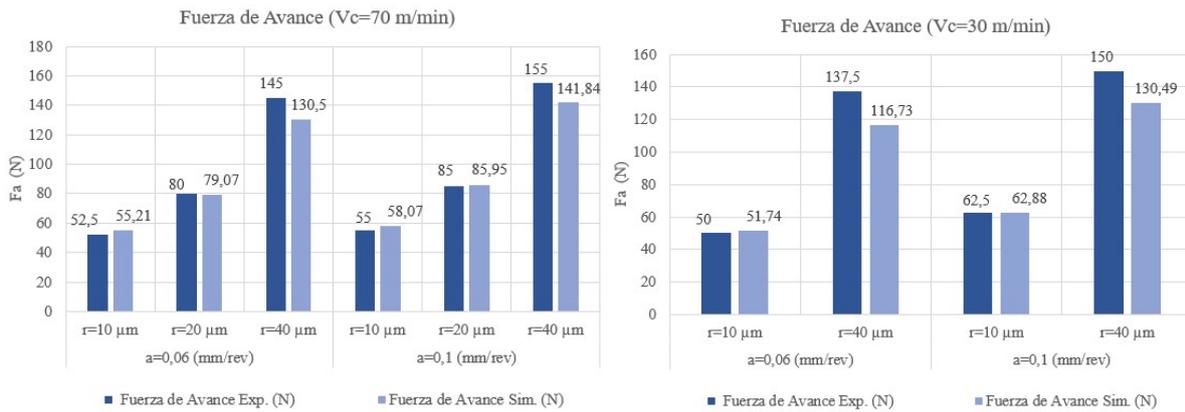


Figura 4: Fuerzas de avance experimentales y obtenidas a partir de modelización numérica para las 10 condiciones consideradas para la validación de los modelos.

4. Resultados

A continuación, se muestran los principales resultados obtenidos a partir de los modelos numéricos desarrollados.

4.1. Componentes de la fuerza de mecanizado

Las gráficas de la Figura 5 muestran el efecto del radio de filo y del avance para 3 de las geometrías de filo con redondeo simétrico.

El efecto del aumento del radio del filo se traduce en un elevado incremento de la fuerza de avance debido a la fuerza de empuje que provoca sobre la superficie de incidencia de la herramienta la recuperación elástica del material. En concreto, la fuerza de avance para el redondeo mayor es 2,4 veces superior a la fuerza de avance obtenida con la herramienta de menor redondeo. La fuerza de corte se ve mucho menos afectada por el radio del redondeo del filo.

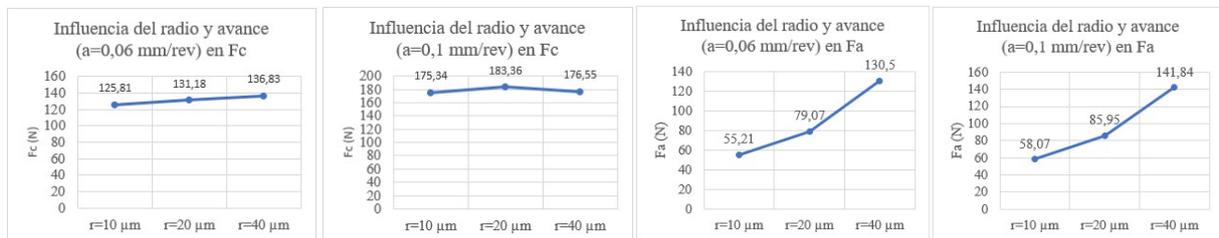


Figura 5: Influencia sobre la fuerza de corte y la fuerza de avance del radio de redondeo del filo y del avance para herramientas con redondeo de simétrico.

Las gráficas de la Figura 6 muestran información análoga, pero para las 2 geometrías de filo con redondeo asimétrico y para la geometría con redondeo simétrico del mismo valor.

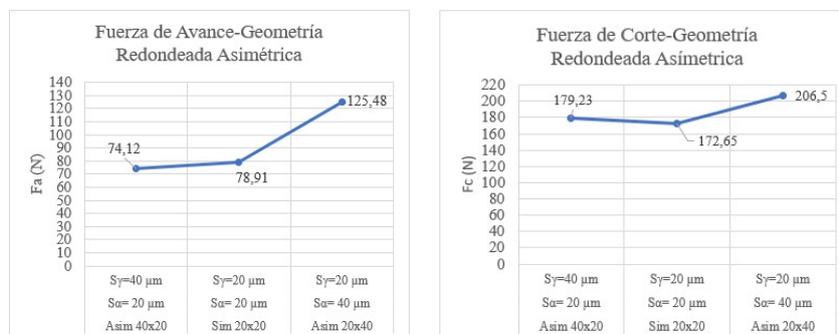


Figura 6: Influencia sobre la fuerza de corte y la fuerza de avance de la geometría del filo y del avance para las 2 herramientas con redondeo asimétrico y la herramienta con redondeo simétrico del mismo valor.

La tendencia más destacable que se observa consiste en que la herramienta con redondeo asimétrico ($S\gamma=40\mu\text{m}$; $S\alpha=20\mu\text{m}$), presenta fuerzas de avance y de corte muy similares a la herramienta con redondeo simétrico ($S\gamma=20\mu\text{m}$; $S\alpha=20\mu\text{m}$). Sin embargo, para la geometría de herramienta asimétrica ($S\gamma=20\mu\text{m}$; $S\alpha=40\mu\text{m}$) se obtienen fuerzas de avance un 65% superiores y fuerzas de corte un 18% mayores. Este resultado confirma el interés de trabajar con herramientas con filos con redondeos asimétricos (en este caso con geometrías que cumplan que $S\gamma>S\alpha$) debido a que permiten combinar fuerzas de mecanizado moderadas con una mayor robustez de filo.

4.2. Temperatura máxima en la zona de corte

Debido a que las simulaciones numéricas corresponden a tiempos de corte extremadamente reducidos (pocos milisegundos) la temperatura en la herramienta no llega a estabilizar alcanzando valores mucho menores que los propios del mecanizado de aleaciones de titanio. Por ello, las temperaturas máximas en la zona de corte se producen en la viruta, en concreto en la zona de contacto viruta-herramienta (Ver Figura 7).

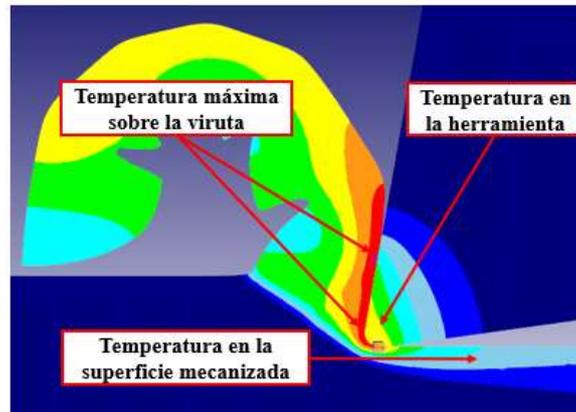


Figura 7: Distribución de temperatura en la zona de corte correspondiente al modelo con redondeo simétrico de radio= $10\mu\text{m}$, $v_c=70\text{m/min}$ y $a=0,1\text{mm/rev}$.

En la Figura 8 se muestran las temperaturas máximas alcanzadas en la zona de corte para distintas simulaciones realizadas con herramientas con redondeos simétricos y con herramientas con redondeos asimétricos.

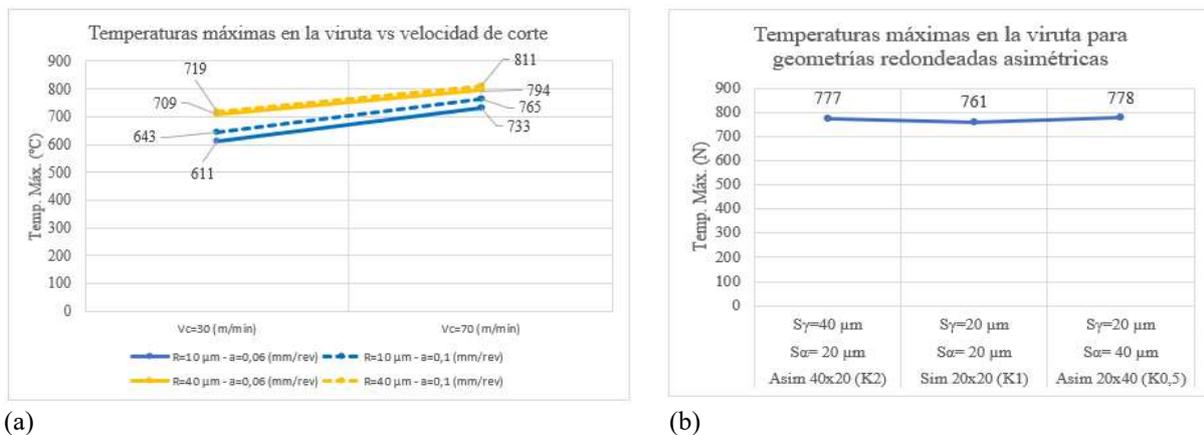


Figura 8: Temperatura máxima alcanzada en la zona de corte; (a) para herramientas con redondeo simétrico y (b) para herramientas con redondeo asimétrico (para los parámetros de corte $v_c=70\text{m/min}$; $a=0,1\text{mm/rev}$).

Para las herramientas con filo con redondeo simétrico (Figura 8-a), se observa que al aumentar la velocidad de corte de 30m/min a 70m/min se alcanzan temperaturas máximas en la zona de corte hasta un 20% superiores. El incremento del avance da lugar a incrementos mucho más reducidos de la temperatura (aumento máximo del 5%). Mayores radios de redondeo de filo dan lugar a incrementos de la temperatura máxima de hasta un 16%.

En relación con el efecto de emplear redondeos asimétricos, en la Figura 8-b se muestran a modo de ejemplo, para las simulaciones con velocidad de corte 70m/min y avance $0,1\text{mm/rev}$, las temperaturas máximas para las 3 geometrías de filo consideradas, no observándose un efecto significativo.

4.3. Presión normal sobre la herramienta de corte

Por último, se analiza la presión normal que ejerce el material sobre la herramienta en sentido perpendicular a su perfil, y que se reparte entre la superficie de desprendimiento y la superficie de incidencia. Esta magnitud presenta una gran relevancia por su importante efecto sobre el desgaste de la herramienta.

El comportamiento es similar para los distintos parámetros de corte considerados por lo que se muestran a modo de ejemplo los resultados correspondientes a las simulaciones realizadas con $v_c=70\text{m/min}$ y $a=0,1\text{mm/rev}$. En la Figura 9 se muestra para las distintas geometrías de filo consideradas cómo varía la presión normal sobre la herramienta en función de la distancia al punto en el que la herramienta pierde el contacto con la superficie mecanizada.

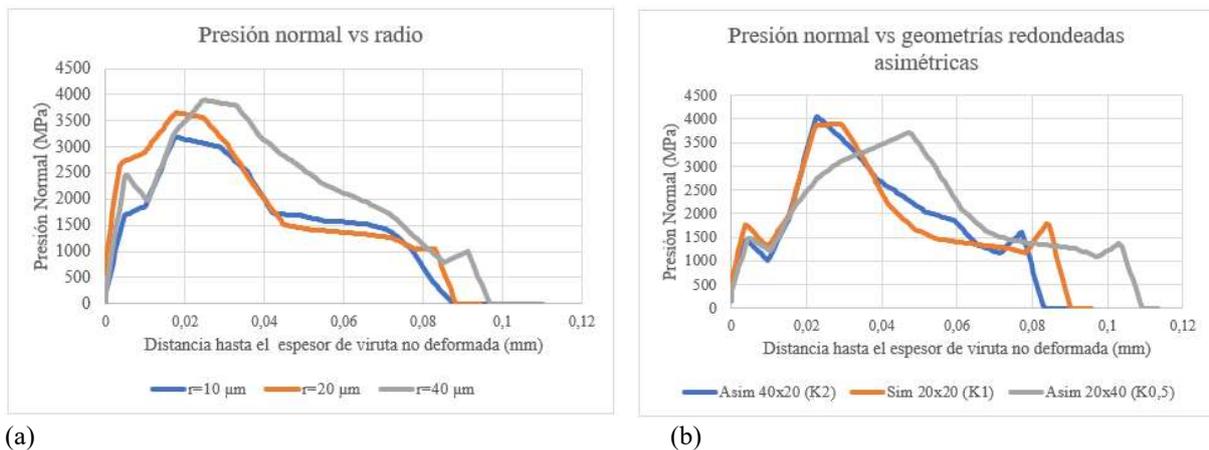


Figura 9: Distribución de presión normal en función de la distancia al final del contacto superficie mecanizada-herramienta; (a) para herramientas con redondeo simétrico y (b) para herramientas con redondeo asimétrico.

Para las herramientas con filo con redondeo simétrico (Figura 9-a), se observa cómo el incremento del radio del filo provoca un pequeño incremento de la longitud de contacto herramienta-material y un significativo incremento del valor máximo de la presión normal de hasta un 25%.

Las herramientas con redondeo asimétrico (Figura 9-a) muestran variaciones de la presión normal máxima menos relevantes, siendo un 9% inferiores para la geometría $S\gamma=20\ \mu\text{m}$ y $S\alpha=40\ \mu\text{m}$. No obstante, esa geometría presenta una longitud de contacto herramienta-material casi un 30% mayor que la observada para la simulación con geometría $S\gamma=40\ \mu\text{m}$ y $S\alpha=20\ \mu\text{m}$.

5. Conclusiones

Las principales conclusiones que pueden extraerse del trabajo descrito son las siguientes:

- Se ha desarrollado un modelo numérico bidimensional correspondiente al mecanizado de la aleación Ti6Al4V considerando distintas geometrías de filo con redondeos simétricos y asimétricos. La validación experimental realizada indica en general una buena correlación, habiéndose obtenido errores medios para la fuerza de corte del 3,16% y para la fuerza de avance del 6,37%.
- El análisis de las fuerzas de mecanizado confirma el interés de trabajar con herramientas con filos con redondeos asimétricos debido a que configuraciones adecuadas presentan fuerzas de mecanizado moderadas con una mayor robustez del filo.
- Para las herramientas con redondeo simétrico, la temperatura máxima en la zona de corte se incrementa significativamente al aumentar el radio del filo. Sin embargo, emplear redondeos asimétricos no tiene un efecto relevante sobre dicha temperatura.
- Para las herramientas con redondeo simétrico, la presión normal máxima que ejerce el material sobre la herramienta se incrementa hasta un 25% al aumentar el radio de redondeo desde 10 hasta $40\ \mu\text{m}$. Las herramientas con redondeo asimétrico muestran variaciones de la presión normal máxima menos relevantes, pero sí se observan cambios significativos en la longitud de contacto herramienta-material.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen la ayuda y soporte financiero de la Agencia Estatal de Investigación a través del Proyecto PID2023-151610OB-C21 financiado por MICIU/AEI/ 10.13039/501100011033 and FEDER/UE.

7. Referencias

- [1] C. F. Wyen y K. Wegener, “Influence of Cutting Edge Radius on Cutting Forces in Machining Titanium”, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, **59**, 93-96, (2010)
- [2] Denkena, D. Biermann. Cutting edge geometries. *CIRP Annals*, Volume 63, Issue 2, 2014, Pages 631-653, ISSN 0007-8506. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.009>.
- [3] K. Zhuang, C. Fu, J. Weng, and C. Hu, “Cutting edge microgeometries in metal cutting: A review,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 116, no. 7, pp. 2045–2092, Oct. 2021. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07558-6>.
- [4] K. Bouzakis et al., “Effect of cutting edge preparation of coated tools on their performance in milling various materials,” *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 7, no. 3, pp. 264–273, 2014. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2014.05>.
- [5] E. Bassett, J. Köhler, and B. Denkena, “On the honed cutting edge and its side effects during orthogonal turning operations of aisi1045 with coated wc-co inserts,” *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 5, no. 2, pp. 108–126, 2012. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2012.03.004>.
- [6] B. Bergmann, T. Grove, Basic principles for the design of cutting edge roundings, *CIRP Annals*, Volume 67, Issue 1, 2018, Pages 73-78, ISSN 0007-8506, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.019>.
- [7] P. Mativenga et al, Engineered design of cutting tool material, geometry, and coating for optimal performance and customized applications: A review, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Volume 52, 2024, Pages 212-228, ISSN 1755-5817, <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2024.06.001>.
- [8] Ozel T, Zeren E. Finite element analysis of the influence of edge roundness on the stress and temperature fields induced by high speed machining. *Int J Adv Manuf Technol* 35:255–267, 2007
- [9] Tiffe M, Aßmuth R, Saelzer J, Biermann D. Investigation on cutting edge preparation and FEM assisted optimization of the cutting edge micro shape for machining of nickel-base alloy. *04/11 Prod Eng* 2019;vol. 13. <https://doi.org/10.1007/s11740-019-00900-8>.
- [10] Biermann D, Amuth R, Hess S, Tiffe M. Simulation based analysis and optimisation of the cutting edge micro shape for machining of nickel-base alloys. *01/01/ 2018 Procedia CIRP* 2018;vol. 67:284–9. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.214>.
- [11] B. Li, S. Zhang, J. Du, and Y. Sun, “State-of-the-art in cutting performance and surface integrity considering tool edge micro-geometry in metal cutting process,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 77, pp. 380–411, 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.03.037>.