

Análisis numérico 3D de las magnitudes termomecánicas relacionadas con el desgaste de mella en procesos de mecanizado en seco de Inconel 718

J. Díaz Álvarez⁽¹⁾, J.L. Cantero Guisández⁽¹⁾, J.A. De La Cruz Hernández⁽¹⁾, M.H. Miguelez Garrido⁽¹⁾

(1) Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universidad Carlos III de Madrid
jodiaz@ing.uc3m.es

Uno de los mecanismos de desgaste que más frecuentemente conducen al fin de vida de herramienta en los procesos de mecanizado en seco de la aleación Inconel 718 es el desgaste de mella. En este trabajo se presenta un modelo numérico de estos procesos para el análisis de las variables termomecánicas relacionadas con este tipo de desgaste. En la actualidad, la modelización numérica del proceso de mecanizado se ha convertido en un recurso muy útil para el análisis de procesos de mecanizado (se pueden predecir magnitudes de difícil medida). Generalmente el desarrollo de modelos de elementos finitos se limita al campo bidimensional por la complejidad de los modelos tridimensionales. Sin embargo las simplificaciones que se realizan en los modelos 2D, válidas para procesos de corte ortogonal o determinados tipos de análisis simplificados, no son adecuadas para el estudio del desgaste de mella por sus características particulares. Se trata de un tipo de desgaste que se produce en una zona concreta del filo de la herramienta (zona correspondiente al final de la profundidad de pasada) y que se ve muy afectado por el ángulo de posición del filo principal de la herramienta. Estas características únicamente pueden analizarse mediante modelos tridimensionales.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de Inconel 718 se ha extendido rápidamente siendo su principal consumidor la industria aeroespacial debido a sus excelentes propiedades mecánicas mantenidas a altas temperaturas. Actualmente el mecanizado de Inconel 718 continúa siendo un reto especialmente en seco. Su tendencia a endurecerse durante el mecanizado se ha relacionado con la aparición de mella [1], incluso se considera a este fenómeno uno de los principales factores de dicha aparición.

En diversos estudios se analizó la influencia del ángulo de posición en el tipo de desgaste encontrado, observándose que para mayores ángulos de posición, al ser la longitud del filo de la herramienta en contacto con el material mayor (y por tanto, el espesor de viruta menor) se obtenían menores valores en las distribuciones de las fuerzas de corte y del calor generado. El hecho de distribuir las fuerzas de corte sobre una mayor longitud redundaba en un aumento de la vida de la herramienta [2]. Además, en los mecanizados con ángulo de posición del filo principal cercanos a 0° se observan picos de dichas magnitudes en la zona correspondiente al final de profundidad de pasada, relacionados con la aparición de desgaste de mella [3].

Aunque no hay un consenso entre los diferentes autores que han estudiado el efecto del ángulo de posición en los fenómenos de desgaste encontrados, se podría decir como conclusión general que al aumentar el ángulo de posición de la herramienta se reduce la aparición de mella [4].

Resultados similares a los descritos han sido observados en ensayos de desgaste en torneado en seco de Inconel 718 realizados por los autores de este trabajo. Estos resultados están actualmente en proceso de revisión para su publicación. Los ensayos se realizaron empleando plaquitas rómbicas de metal duro con recubrimiento TiAlN+TiN de tipo PVD (recubrimiento denominado TS2000 por el fabricante de herramientas SECO). El radio de punta de las herramientas fue de 0,4mm. Los parámetros de corte considerados fueron:

velocidades de corte entre 30 y 70m/min, avance 0,1mm/rev y profundidad de pasada 0,5mm. Se emplearon 2 ángulos de posición del filo principal, 0° y 45°, observándose una significativa influencia del ángulo posición en el desarrollo de desgaste de mella.

En la actualidad el uso de los códigos de elementos finitos para el estudio de los procesos de arranque de viruta se ha extendido notablemente. Originalmente debido en gran parte al coste computacional los modelos que se desarrollaban eran principalmente de 2D. Sin embargo las simplificaciones que se realizan en los modelos 2D, válidas para procesos de corte ortogonal o determinados tipos de análisis simplificados, no son adecuadas para el estudio del desgaste de mella por sus características particulares [5].

Este artículo se centra en el desarrollo de un modelo de elementos finitos tridimensional para una mejor comprensión de los fenómenos que se desarrollan durante el mecanizado de Inconel 718, con objetivo de relacionar el desgaste tipo mella con el ángulo de posición de la herramienta.

2. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Como se ha señalado en la introducción, se ha desarrollado un modelo de elementos finitos en 3D, para ello se empleo el código comercial Deform 3D. Las simulaciones realizadas son del tipo lagrangiano incremental.

Las características del modelo (geometría, condiciones de contorno, etc.) se definen en base a las condiciones de los ensayos de desgaste descritos en el anterior apartado en los que se observó la influencia del ángulo de posición del filo principal sobre el desgaste de mella. Por tanto, se considera avance 0,1mm y profundidad de pasada 0,5mm. Se han modelizado 2 velocidades de corte, una de las consideradas en los ensayos de desgaste (70m/min) y una correspondiente a condiciones de alta velocidad (400m/min).

Típicamente y debido al coste computacional en los modelos 3D no se alcanzan tamaños de elementos tan pequeños como en los modelos 2D, por este motivo es muy importante una buena definición de la malla, en este apartado Deform 3D cuenta con una herramienta de remallado automático que hace posible definir mallas muy finas en determinadas zonas en función del tiempo y sus propiedades termomecánicas, dando como resultado una mejor adaptación de la malla a la geometría modelizada durante todo el proceso.

2.1. Geometría

El modelo desarrollado consta por un lado de la herramienta que realiza el arranque de viruta y por el otro de la pieza a mecanizar.

La herramienta modelizada es una plaquita rómbica de 80° y radio de punta 0.4mm, con ángulos incidencia y desprendimiento 7° y 17° respectivamente (no se ha considerado toda la plaquita por carecer de valor añadido en la simulación, sólo se ha modelizado una parte de su geometría real, ver “figura 1”). Se han desarrollado modelos correspondientes a 2 ángulos de posición del filo principal (0° y 45°).

El modelo considera pasadas de corte lineales correspondientes al avance y profundidad de pasada indicados anteriormente. La geometría del material a mecanizar se corresponde con la geometría resultante de las pasadas previas del mecanizado y por tanto es distinta en función del ángulo de posición de filo principal de la herramienta. El material a mecanizar tiene un espesor de 1.3 mm, ancho 2 mm y longitud 4 mm (ver “figura 1”), de forma que el efecto borde no influya en los resultados.

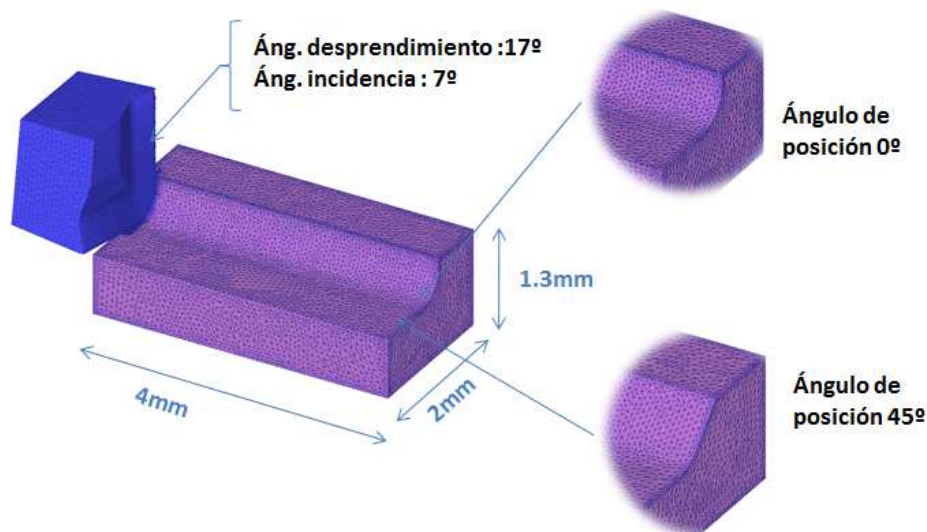


Figura 1. Geometría del modelo.

2.2. Malla

Se ha utilizado un elemento tetraédrico de 4 nodos de integración para mallar tanto la plaquita como la pieza.

Para el caso de la pieza se han empleado 140000 elementos. El mallado no se ha realizado uniformemente, en las zonas de mayor interés se consiguen elementos con una longitud de arista del entorno de $10\ \mu\text{m}$ (ver “figura 2”), para obtener esta diferenciación de zonas se definieron varias ventanas donde se forzó que todos los elementos dentro de esas ventanas tuvieran un tamaño determinado. Además se distribuyó la densidad de elementos en la malla en función de los gradientes de temperatura, deformación, velocidad de deformación y tensión de cada región.

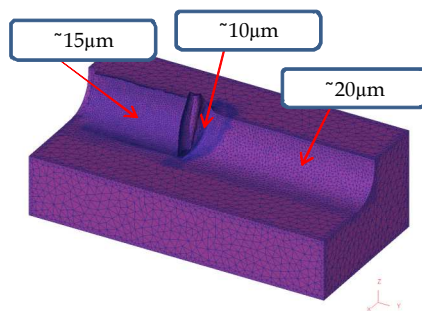


Figura 2. Definición de la malla de la pieza.

Para mallar la plaquita se emplearon 110000 elementos, concentrándose elementos de aproximadamente $10\ \mu\text{m}$ de longitud de arista en la zona de contacto plaquita-pieza. En la “figura 3” se puede ver un detalle de la malla de la plaquita.

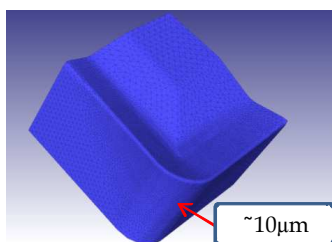


Figura 3. Definición de la malla de la plaquita

2.3. Condiciones de contorno

En el apartado térmico se consideró un coeficiente de convección de $0.08 \text{ N}/(\text{s}\cdot\text{mm}\cdot^\circ\text{C})$, en las superficies libres de la pieza (en la “figura 4” se destacan con flechas amarillas las zonas con flujo convectivo).

En lo referente a la parte mecánica se optó por fijar todos los movimientos de la plaquita, imponiendo el movimiento a la pieza (eje Y en el modelo). El movimiento de la pieza es el correspondiente a la velocidad de corte ($400\text{m}/\text{min}$ y $70\text{m}/\text{min}$).

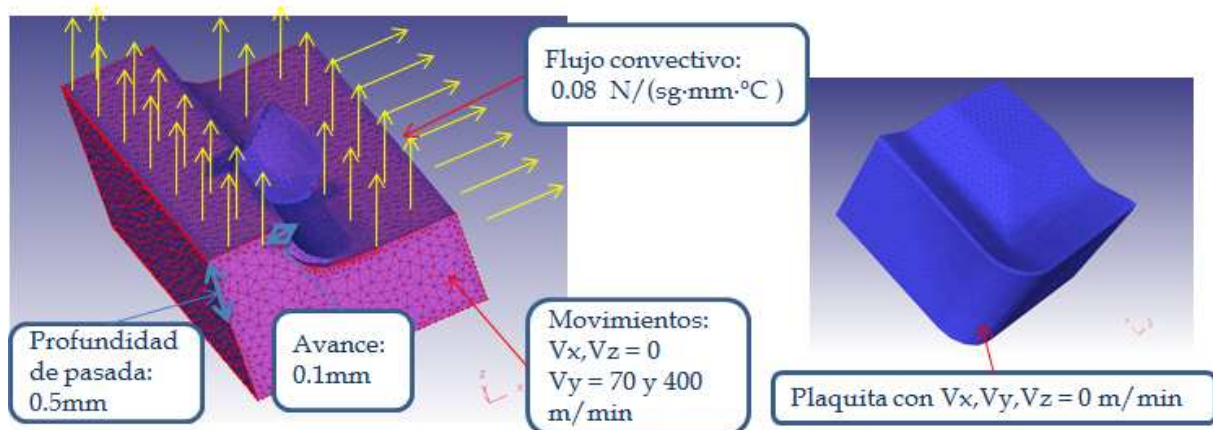


Figura 4. Condiciones de contorno

2.4. Propiedades y condiciones internas del modelo

En lo relativo a la caracterización del material se utilizaron los materiales de la biblioteca de Deform testados por AMTC, para el caso del material de la pieza se empleó el Inconel 718 machining AMTC (los elementos utilizados fueron del tipo elastoplástico) y para el caso de la plaquita se usó carburo de wolframio (se modelizó con elementos rígidos).

Al tratarse de un modelo en 3D con una buena herramienta de remallado no se ha implementado ningún criterio de rotura, ya que esto ralentizaría las simulaciones (cada simulación conlleva un coste computacional de en torno a 3 meses empleando equipos informáticos tipo PC con capacidad procesamiento media).

Se estableció que el 90% del trabajo mecánico se transformara en calor. En las zonas de contacto herramienta-material se estableció una ley de fricción de tipo Coulomb con un coeficiente de rozamiento de 0.8.

3. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

La validación de los modelos numéricos se realizó en base a la comparación de la fuerza de corte obtenida numéricamente con la obtenida en ensayos realizados en un torno Pinacho Smart turn 6/165 equipado con un dinamómetro Kistler 9257B.

Se utilizaron discos de Inconel 718. La herramienta utilizada se colocó como se muestra en la “figura 5”, el eje longitudinal de la herramienta fue posicionado paralelamente al husillo principal del torno, y la dirección de avance de la herramienta fue perpendicular al mismo. Se utilizaron plaquitas rómbicas de 80° de metal duro con recubrimiento $\text{TiAlN}+\text{TiN}$ de tipo PVD (recubrimiento denominado TS2000 por el fabricante de herramientas SECO), con radio de punta $0,4\text{mm}$, ángulos de incidencia y desprendimiento 7° y 17° respectivamente y 2 ángulos de posición (0° y 45°).

Se realizaron ensayos con los parámetros de corte considerados en los modelos numéricos: velocidades de corte de $70\text{m}/\text{min}$ y $400\text{m}/\text{min}$, avance y profundidad de pasada fijos y de valores $0.1\text{mm}/\text{rev}$ y 0.5mm respectivamente.

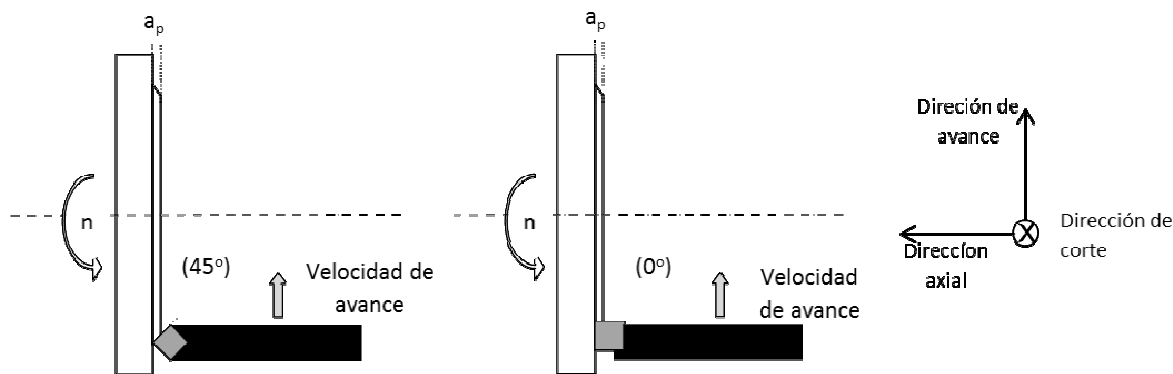


Figura 5. Esquema del montaje de la herramienta con ángulo de posición 45° y 0°

En la “figura 6” se representan las fuerzas de corte obtenidas numéricamente y experimentalmente para las mismas condiciones de corte, observándose una buena correlación en dichos resultados (desviaciones menores del 4%).

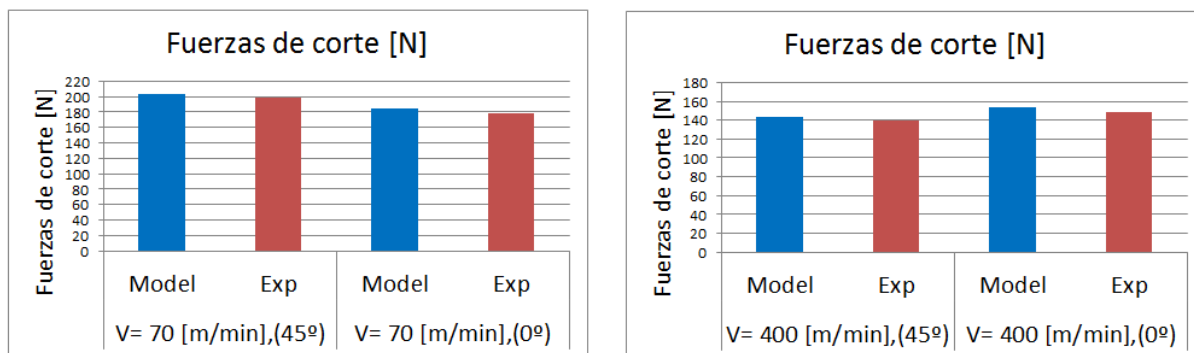


Figura 6. Comparación de las fuerzas de corte modelo vs datos experimentales

4. RESULTADOS

Diversos autores han indicado que la aparición de desgaste de mella está relacionada con el endurecimiento de la superficie del material debido a su deformación durante el mecanizado. Asimismo, la temperatura es una de las magnitudes que influye en el desgaste de la herramienta.

Una vez validado el modelo se utilizará para predecir la temperatura y la deformación equivalente alcanzadas en la superficie mecanizada, realizándose el análisis comparativo de dichas magnitudes para los 2 ángulos de posición considerados.

En la “figura 7” se muestran las distribuciones de deformaciones efectivas encontradas para los ángulos de posición 0° y 45° para la velocidad de corte de 70m/min. Para ángulos de posición 0° resalta claramente una zona de altas deformaciones plásticas, llegando incluso a apreciarse rebabas, en las demás zonas mecanizadas se encuentran valores mucho menores y una distribución homogénea. En el caso de ángulo de posición 45° se observa una distribución de deformación equivalente homogénea en toda la superficie mecanizada. Los resultados para la velocidad 400m/min son similares.

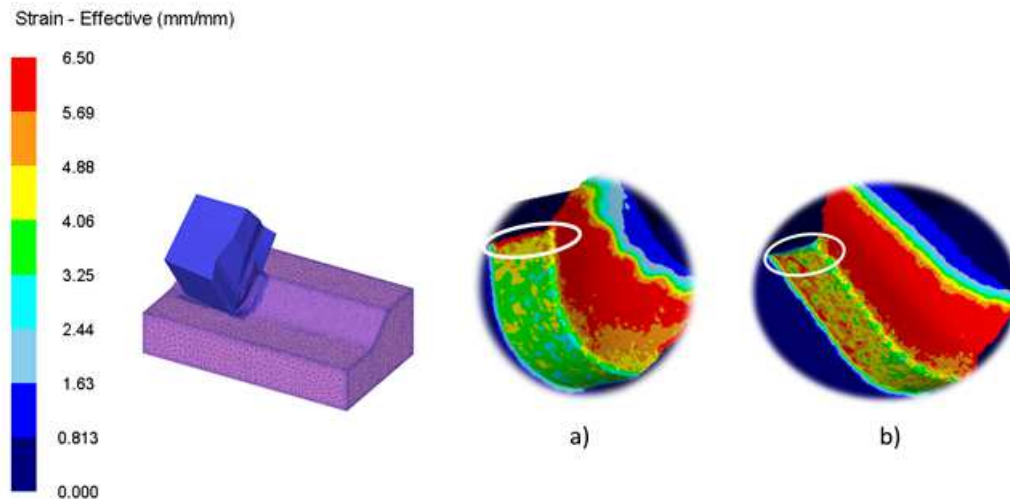


Figura 7. Deformación efectiva en la superficie mecanizada: a) Ángulo de posición 0° ; b) Ángulo de posición 45°

En la “figura 8” están representadas las distribuciones de temperatura para ángulos de posición 0° y 45° , correspondiente a una simulación con una velocidad de corte de 70m/min. Para el ángulo de posición de la herramienta 0° (mayor espesor de viruta no deformada) se alcanzan temperaturas superiores que para la herramienta con ángulo de posición 45° . Además, cuando el ángulo de posición es 0° se observan mayores gradientes de temperatura en la superficie mecanizada a lo largo del filo, siendo máximos en la zona final de profundidad pasada (zona en la que se produce el desgaste de mella). Los resultados para la velocidad 400m/min son similares.

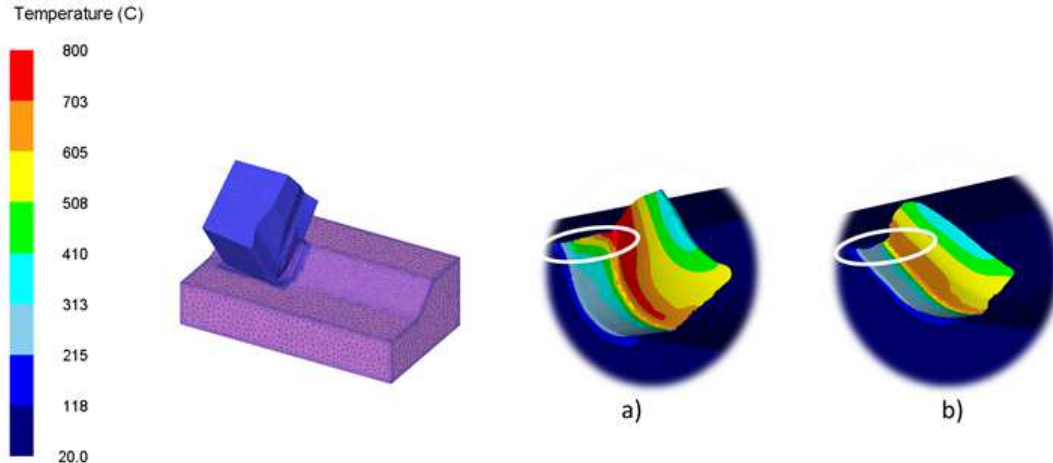


Figura 8. a) Distribución de temperaturas para ángulo de posición 0° , b) Distribución de temperaturas para ángulo de posición 45°

5. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado y validado experimentalmente un modelo 3D de mecanizado en seco de la aleación Inconel 718 con ángulos de posición del filo principal de la herramienta 0° y 45° .

Los resultados numéricos con ángulo de posición 0° muestran valores de deformación efectiva y temperatura en la superficie mecanizada mayores que los obtenidos con ángulo de posición 45° . Además, se observan valores máximos localizados en la zona final de la profundidad de pasada (zona correspondiente a la formación del desgaste de mella). El modelo con ángulo 45° muestra resultados homogéneos a lo largo de toda la superficie

mecanizada. Estos resultados son coherentes con el hecho de que ángulos de posición del filo pequeños se correspondan con un mayor desgaste de mella de la herramienta.

Agradecimientos.

Los autores agradecen la financiación de este trabajo al Ministerio de Ciencia y Tecnología, la Comunidad de Madrid y la Universidad Carlos III de Madrid mediante los proyectos CCG08-UC3M/DPI-4494 y DPI 2008-06746.

6. REFERENCIAS

- [1] Y.S. Liaoa,, H.M. Linb, J.H. Wangc, Behaviors of end milling Inconel 718 superalloy by cemented carbide tools, *Journal of Materials Processing Technology*, 201, 1–3 (2008), 460-465.
- [2] D Dudzinski, A Devillez, A Moufki, D Larrouquère, V Zerrouki, J Vigneau, A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44, 4 (2004), 439-456.
- [3] M. Rahman, W.K.H. Seah, T.T. Teo, The machinability of inconel 718, *Journal of Materials Processing Technology*, 63, 1–3 (1997), 199-204.
- [4] E.O. Ezugwu, Z.M. Wang, A.R. Machado, The machinability of nickel-based alloys: a review, *Journal of Materials Processing Technology*, 86, 1–3 (1998), 1-16.
- [5] E. Ceretti, C. Lazzaroni, L. Menegardo, T. Altan, Turning simulations using a three-dimensional FEM code, *Journal of Materials Processing Technology*, 98, 1 (2000) 99-103.