

## **Análisis de estrategias de mallado para modelizar en 3D procesos de taladrado en Ti6Al4V**

J. De La Cruz Hernández, J.L. Cantero Guisández, J. Díaz Álvarez, M.H. Miguélez Garrido

*Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universidad Carlos III de Madrid  
jlcruz@ing.uc3m.es*

---

*El desarrollo de modelos numéricos de mecanizado permite obtener magnitudes difíciles de medir. Modelizar procesos como taladrado requiere modelos 3D que suponen grandes tiempos de cálculo. En concreto enorme cantidad de elementos mallado por lo que es necesario optimizar el mallado. Por ese motivo este estudio se centra en el desarrollo de una estrategia de mallado de un modelo tridimensional basado en el Método de los Elementos Finitos del taladrado del material Ti6Al4V. Consideraron varios mallados del material determinándose el más adecuado en base a la estabilidad de las componentes de la fuerza, la morfología de la viruta, las distribuciones térmicas en la superficie mecanizada y menores tiempos de simulación.*

---

### **1. INTRODUCCIÓN**

El mecanizado en seco de la aleación Ti6Al4V presenta importantes dificultades debido a que a las altas temperaturas alcanzadas en la zona de corte, dicho material presenta una elevada reactividad. En este tipo de procesos se observa un rápido desgaste de la herramienta y un riesgo importante de daño superficial en el material debido al mecanizado, que a su vez se incrementa con el desgaste de la herramienta [1]. El desarrollo de modelos numéricos de mecanizado permite obtener magnitudes difíciles de medir, de interés para el análisis del efecto de considerar distintas condiciones de trabajos sobre el daño debido a mecanizado. Los modelos de mecanizado existentes son mayoritariamente bidimensionales (2D). Dichos modelos bidimensionales son adecuados solo para procesos con condiciones de corte ortogonal [2] y por tanto no permiten analizar en su totalidad las magnitudes implicadas en los procesos de taladrado. Las simulaciones de modelos numéricos de taladrado en 3D requieren grandes tiempos de cálculo que dependen principalmente de la geometría a modelizar (geometrías de la broca y del material y número de revoluciones de la herramienta a simular), de la densidad de mallado y de parámetros del modelo como el incremento de tiempo por paso. En concreto, el mallado en los modelos 3D requiere un número de elementos muy superior a los mallados análogos empleados en modelos 2D. Es fundamental realizar un análisis previo exhaustivo para determinar la configuración del mallado (especialmente de la pieza) que permite obtener los mejores resultados.

### **2. MODELO NUMÉRICO**

Los modelos numéricos mostrados en este trabajo se han desarrollado empleando el programa de elementos finitos DEFORM 3DTMv6.1. Este código emplea formulación Lagrangiana y remallado automático, diseñado para el análisis de procesos de conformado y de tratamientos térmicos. Al simular estos procesos de fabricación mediante ordenador, esta herramienta permite a los diseñadores reducir el coste y tiempo de ensayos y prevenir errores en el rediseño de herramientas y procesos.

Los modelos numéricos se corresponden con procesos de taladrado en seco de Ti6Al4V empleando brocas helicoidales de metal duro con recubrimiento TiN, de diámetro 6mm.

Para garantizar que la distancia entre la pared del taladro y el borde de la pieza es suficiente se estableció una geometría de pieza cilíndrica de diámetro 10mm y altura 2mm. La

geometría de la herramienta se utilizó una broca de 6mm de diámetro con un ángulo de punta 140°, ángulo de hélice 30° y punta 1.2 mm.

El material que se utilizó en la elaboración en el modelo es Titanio concretamente la aleación Ti6Al4V, modelizada como plástico motivado que se realizaron numerosas simulaciones con comportamiento elastoplástico del material y fue imposible obtener resultado porque no converge por eso se opta utilizar material plástico para la pieza. En la herramienta se utilizó un carburo de wolframio recubierto con TiN (2 $\mu$ m) obtenido ambos de la biblioteca del DEFORM3DTMv.6.1. El material de corte (metal duro) se modeliza como rígido.

Las condiciones de contorno de movimiento de pieza, se impidió el desplazamiento de los nodos correspondiente al contorno de disco, velocidades X, Y, Z = 0. En cuanto a las condiciones de contorno térmicas, se establece que inicialmente el material esté a la temperatura ambiente (20 °C). También se establece un coeficiente de convección constante de 0,02 N/(s·mm·°C), que corresponde al valor de disipación de calor al aire por convección libre y representa adecuadamente las condiciones propias de procesos de taladrado en seco. Ambos valores, se han definido en el menú de controles de la simulación. Estos valores se han definido en la herramienta en toda la superficie el coeficiente de convección. Con relación a la pieza el coeficiente de convección se define solo en la superficie superior e inferior y se mantiene alrededor de la pieza la temperatura ambiente considerando que en el tiempo simulado no da tiempo a que el calor incremente la temperatura en el borde de la pieza. En la zona de contacto viruta-herramienta se ha establecido para nuestro caso utilizar coeficiente de fricción 0,6 y coeficiente de transferencia 45 N/(s·mm·°C) [3].

Se desarrolló un modelo inicial con velocidad de corte ( $V_c$ ) 50 m/min y avance ( $a$ ) 0,07 mm/rev al cual se denominará modelo estándar. Con el modelo se han realizado una serie de simulaciones con una profundidad de taladrado de 0,4 mm para valorar el comportamiento de la malla. Se fijaron hasta 12000 pasos para el caso estándar. El incremento de tiempo es de 1.10e-4 segundos para todos los casos. Debido a la complejidad del modelo y a la gran cantidad de remallados necesarios, la simulaciones suponen tiempos de entre 1 y 3 meses y los ficheros resultantes tienen un tamaño muy elevado (entre 70 y 150 Gbytes).

En todos los mallados considerados se definió una zona cilíndrica con diámetro 6,5mm de mallado más denso correspondiente al taladro y zonas cercanas. Se consideraron 5 mallados, 3 de ellos con densidad homogénea en la zona cilíndrica de diámetro 6,5mm y 2 con densidad variable en dicha zona. Obtenida mediante utilización de coeficientes de peso obtenida mediante la utilización de coeficientes de peso (weighting factors) y definiendo mallado absoluto en la zona de corte en la que los gradientes de las magnitudes termomecánicas son máximos. En concreto (ver figura 1):

- Mallado 1: Mallado con elementos de tamaño homogéneo de 0,07 mm
- Mallado 2: Mallado con elementos de tamaño homogéneo de 0,128 mm
- Mallado 3: Mallado con elementos de tamaño homogéneo de 0,3 mm
- Mallado 4: Mallado fino en la zona de corte con elementos de tamaño de 0,02mm a 0,128 mm.
- Mallado 5: Mallado fino en la zona de corte con elementos de tamaño de 0,02mm a 0,3 mm.

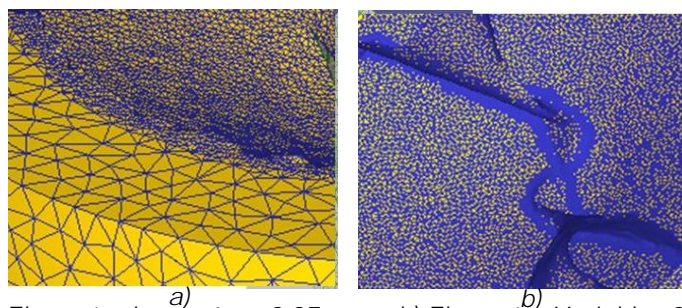


Fig. 1 Mallado: a) Elementos homogéneo 0,07 mm y b) Elementos Variables 0,02 mm a 0,128mm

El mallado del material expuesto anteriormente requiere de aproximadamente elementos tetraédricos para toda la pieza entre 100.000 a 190.000 elementos depende del tiempo simulación y cantidad de viruta generada. Es de notar que a mayor de 200.000 elementos el software no responde en óptimas condiciones. De la misma manera utilizando elementos menores 0,07mm en la zona que cubre el diámetro de la broca presenta frecuentemente problema de capacidad de los ordenadores de alta tecnología. Los modelos no avanzan a utilizar cantidades 250.000 elementos. Dado a estos inconvenientes jugamos con mallado de elementos absolutos y definiendo pesos al mallado utilizado.

### 3. RESULTADOS

En primer lugar se realiza el análisis comparativo de los resultados obtenidos empleando mallados con una densidad homogénea en la zona cilíndrica de diámetro 6,5mm (mallados 1, 2 y 3). En la figura 2 se muestra la evolución de la fuerza axial con la profundidad de taladro para las densidades de mallado consideradas.

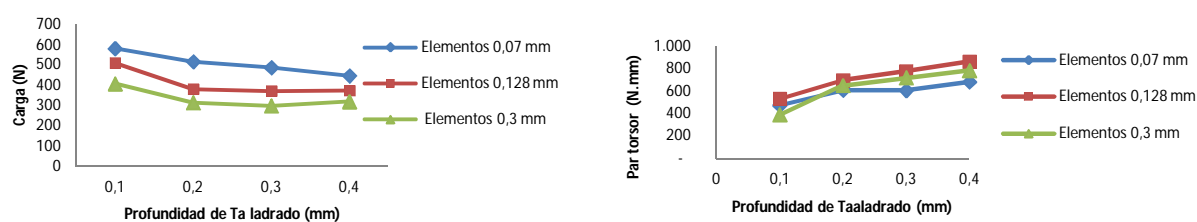


Fig. 2 Evolución de la fuerza axial (z) y par torsor para diferentes densidades de malla utilizando elementos homogéneo de 0,07mm, 0,128mm, y 0,3 mm en la zona de corte.

De esta manera se comprueba que aunque la forma de evolución temporal de la fuerzas son parecidas las magnitudes son muy diferentes, manteniendo una variación media 19% para elementos 0,128mm y 35% elementos 0,3mm respecto a elementos menor 0,07mm. Por esta razón debemos emplear emplear la malla más densa posible.

Con relación al par torsor la tendencia es lo contrario con la fuerzas a tamaños menores el par torso es menor y mantiene una variación media 20% para elementos 0,128mm y 15% elementos 0,3mm respecto a elementos menor 0,07mm. Asimismo el comportamiento del par torso mantiene una variación muy similar a los resultados de las fuerzas axial pero aun es necesario emplear la malla más densa posible ya que las oscilaciones para elementos malla mayores 0,07mm son muy altas.

Las tendencias de temperaturas en los casos estudiados de densidad de mallado son muy similares. Solo existe diferencias promedio pequeñas de 1% para elementos 0,3mm y 2% para tamaños de elementos 0,128mm comparando la tendencia con tamaños de elementos menor de 0,07mm. Partiendo de pequeña variación que mantienen la evolución de las temperaturas para los diferentes tipos de mallas se estudia la distribución de la temperatura en la pieza bajo mapa térmico (figura 3).

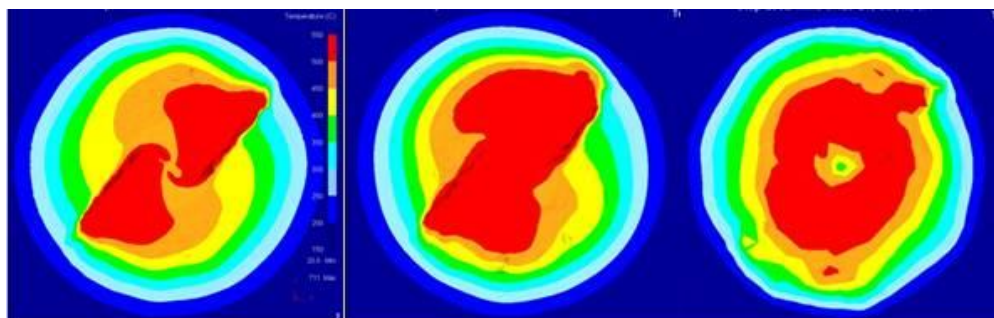


Fig. 3 Mapas Térmicos

Con relación al análisis térmico del material de los tres casos comparados muestra que resultados existe un efecto puntual de la posición angular de los filos. Con el mallado grueso de 0,3mm los elementos son muy grandes y hay mayor presencia de material caliente debido al corte motivo por el cual no da tiempo a que se enfríe el material después de pasar los filos y en el mapa térmico es axial simétrico. Por tanto, esa forma distinta de temperaturas indica que en los modelos con malla poco densa el material acumula más calor del que debería y eso, al ir avanzando la simulación podría afectar a las temperaturas en la pared del taladro (aunque no se aprecie mucho en las primeras revoluciones). Es más razonable la distribución térmica con elementos de 0,07mm mostrando mayores temperaturas en la zona donde están trabajando los filos. Para elementos menores se visualiza un efecto de enfriamiento a medida que el filo de la broca ya ha cortado. Con la utilización de elementos de tamaño de 0,3mm el efecto de enfriamiento no se aprecia donde pasa los filos. Esto muestra que los resultados de los mapas térmicos varían para los modelos considerados y por lo tanto en principio podríamos tener mejores resultados utilizando malla densa de 0,07mm.

Continuando con el análisis de sensibilidad de malla, se muestran los resultados correspondientes a mallados en la zona de corte con densidad variable (mallados 4 y 5). Tal como lo se observa en la figura 4 un primer resultado de utilizar mayor densidad de malla en la zona crítica de corte es obtener una mejor morfología de la viruta con relación a los casos de mallado homogéneo, muestra un caso particular con viruta muy quebradiza y con agujeros.

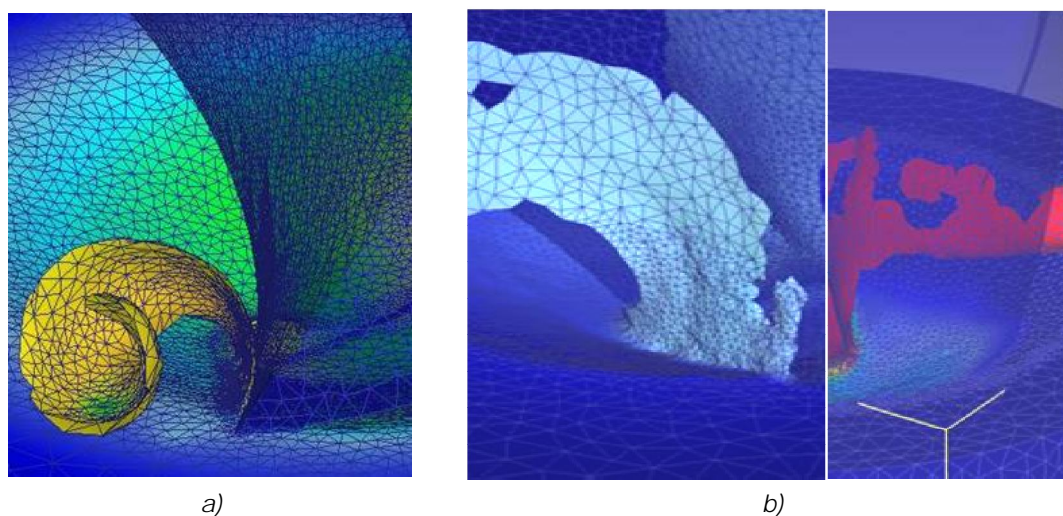


Fig. 4 Comportamiento de la viruta utilizando elementos: a) Variable 0,02 a 0,128 mm y b) homogéneos 0,07 mm

Con respecto a la evolución temporal de la fuerzas tiende el mismo comportamiento en cuanto las magnitudes mantienen una variación media 9% y 26% para elementos con densidad variable respecto el mallado homogéneo con tamaño de elementos 0,07mm, tal como se observa en la figura 5. En cuanto la evolución del par torsor mantiene un mismo comportamiento y las magnitudes mantienen una variación media 2% y 13% para elementos con densidad variable respecto el mallado homogéneo. Por consiguiente la malla de densidad variable "basta" se descarta.

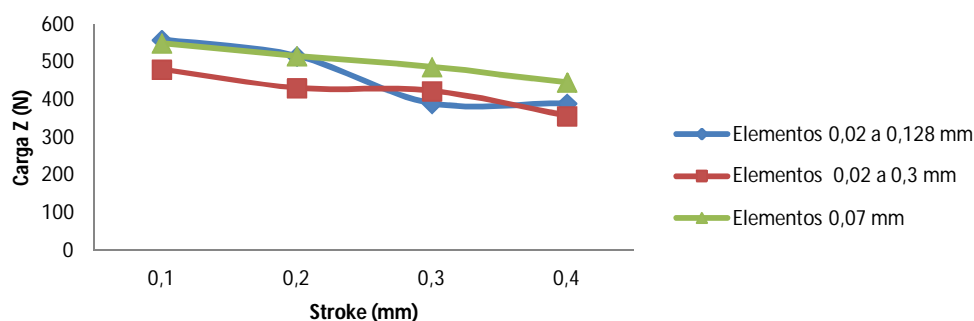


Fig. 5 Evolución de la fuerza (Z) para los 2 mallados con densidad variable en la zona de corte y el mallado homogéneo con elementos de 0,07mm

### 3.1 Comparación de los 2 mallados "densos" (variable y homogéneo) en resultados temperatura:

Tal como se observa en la figura 5 el resultado de analizar los diferentes mallado es de importancia tener elementos tamaños de 0,02mm con densidad variable en la zona de corte para reproducir los elevados gradientes térmicos que se producen con malla homogénea de 0,07mm que alcanzan temperaturas superiores en el material.

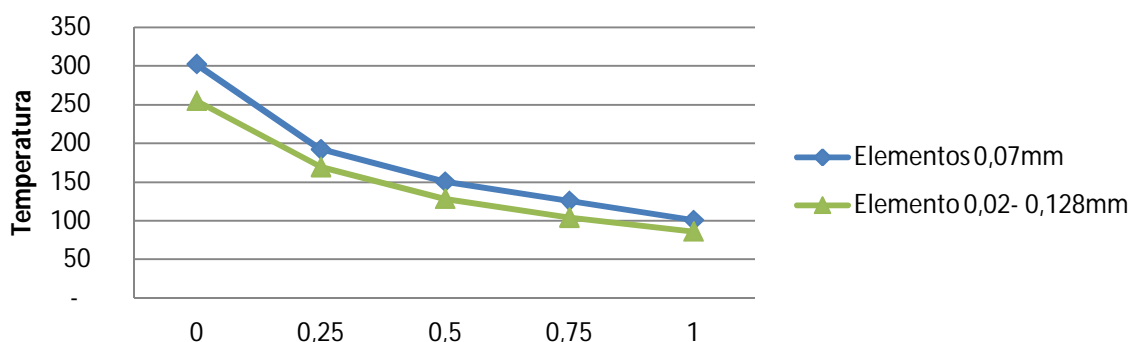


Fig. 5 Evolución de temperatura (0°C - 450 °C) en la pared del taladrado P1 (0,1.62,0) a P5 (0,2.62,0) utilizando elementos 0,02 y 0,07 mm en la zona de corte.

A partir del paso correspondiente a la profundidad de taladrado 0,4mm correspondiente al modelo estándar ( $v_c=50$  m/min y  $a=0,07$  mm/rev) se continuó con la simulación del modelo empleando otras condiciones de corte para una profundidad de taladrado de 0,1mm adicionales. En concreto se realizaron simulaciones con 9 condiciones de corte correspondientes a velocidades de Corte ( $V_c$ ) 30, 50, 70 m/min y avance ( $a$ ) 0,05, 0,07 y 0,1 mm/rev. Y se procede a la validación del modelo en base a resultados experimentales bibliografía. Una vez definido el modelo óptimo y obteniendo resultados numéricos en las condiciones de corte establecidas se procederá a comparar con resultado de ensayo experimentales de las siguientes referencias bibliográficas [4-5]. Es importante destacar que se pretende realizar en el futuro ensayos de validación. Puesto que no se ha encontrado valores para las condiciones concretas del modelo (Geometría de herramienta, parámetros de corte, condiciones de refrigeración, y otras). En consecuencia que los parámetros de corte son distintos en las distintas referencias y distintos a los nuestros modelo en general, se emplearán las fuerzas específicas de corte y de avance para dicha validación en lugar de los valores de fuerzas, tal como se observa en la figura 6. En cuanto a las fuerzas específicas de avance existe diferencias de 16% (Rodrigo P.Z) y 1-7% (Ozden Isbilir) con las condiciones de corte parecidas. Es decir comparamos los resultados con la misma condición de avance. Asimismo mantiene el mismo comportamiento con las fuerzas específicas de corte. Podemos concluir que los modelos numéricos desarrollados se han validado empleando resultados

experimentales obteniendo una buena correlación. Sin embargo esta discrepancia moderada en las fuerzas podría influir en la utilización algunas diferencias en los parámetros de corte. Asimismo como la geometría de herramienta y de la pieza, condiciones de refrigerantes, la fricción del modelo, la ecuación constitutiva del material y la adecuación para cada ensayo experimental.

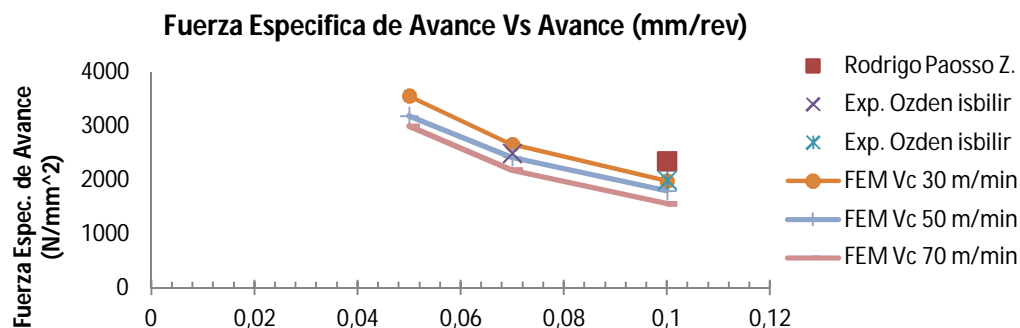


Fig. 6 Fuerzas específicas de avance experimental y numérica.

#### 4. CONCLUSIONES

Los modelación numérica en 3D requieren grandes tiempos de cálculo y dependen principalmente de la longitud a taladrar, densidad de mallado y parámetros de incremento de tiempo. Asimismo, nos bridan magnitudes difíciles de medir y obtener información adicional que no se puede extraer en los modelos en 2D.

Los modelos no avanzan al utilizar cantidades del orden de 250.000 o más elementos en el mallado de la pieza, se han empleado mallados con aproximadamente 190.000 elementos con tamaños absolutos y definiendo pesos en las ventanas de mallado.

Se ha definido como malla óptima la de densidad variable con tamaño de elemento mínimo 0,02mm y hasta 0,128mm en la zona de corte. Esta malla permite obtener oscilaciones de las fuerzas pequeñas, una mejor morfología de la viruta, gradientes térmicos de temperatura en el material más realistas y tiempos de simulación óptimos.

El modelo numérico desarrollado se ha validado empleando resultados experimentales y obteniendo una buena correlación.

#### 5. AGRADECIMENTOS

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] J.L. Cantero, M.M. Tardío, J.A. Canteli, M. Marcos, M.H. Miguélez, Dry Drilling of Alloy Ti-6Al-4V. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* (2005), 45 (11), pp. 1246-1255.
- [2] J.C. Aurich, H. Bil, 3D Finite Element Modelling of Segmented Chip Formation Original Research Article *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, V. 55, Issue 1, 2006, P. 47-50.
- [3] Chris Fischer, Runtime and accuracy issues in three-dimensional finite element simulation of machining, *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 6 (1/2) (2009) 35-42.
- [4] Ozden Isbilira, Elaheh Ghassemieha, Finite Element Analysis of Drilling of Titanium Alloy. *Procedia Engineering* 10 (2011) 1877-1882
- [5] Rodrigo Zeilmann and Walter Weingaertner, "Analysis of temperature during drilling of Ti6Al4V with minimal quantity of lubricant", *Journal of Materials Processing Technology*, 179 (2006), 124-127.